



Universidad
Carlos III de Madrid

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL
COMPORTAMIENTO DE POLÍMEROS
BIOMÉDICOS (PEEK) EN CONDICIONES
DE FLEXIÓN DINÁMICA.**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y
Teoría de Estructuras

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Tutor: Ángel Arias Hernández

Autor: David García Serrano

Madrid, año 2014

*“Si luchas puedes perder;
si no luchas estás perdido.”*

Agradecimientos.

A todas aquellas personas que han hecho de mis estudios universitarios lo que son, algo único. En especial a mis padres y hermana por el ímpetu y capacidad de superación y mejora que siempre me han transmitido.

Agradecer a mis compañeros de clase con los cuales he superado todos estos años y que, en mayor o menor medida, nos hemos ayudado a conseguir el objetivo.

También quería agradecer el apoyo, experiencia, conocimiento y paciencia del profesor Ángel Arias durante la realización del trabajo.

Y por último a ella, porque siempre está ahí.

1. Índice

1. Índice.....	4
2. Resumen.....	7
3. Introducción.....	8
3.1. Motivación.....	8
3.2. Objetivos y metodología.....	9
4. Estado del arte.....	10
4.1. Comportamiento mecánico del PEEK y aplicaciones.....	10
4.1.1. Síntesis.....	12
4.1.2. Propiedades.....	14
4.1.3. Materiales compuestos.....	19
4.1.4. Aplicaciones.....	28
4.1.4.1. Sector aeroespacial.....	28
4.1.4.2. Sector automovilístico.....	30
4.1.4.3. Sector biomédico.....	33
4.1.4.4. Otras aplicaciones.....	39
4.2. Comportamiento mecánico del Al 2024-T3 y aplicaciones.....	40
4.2.1. Obtención.....	41
4.2.2. Propiedades.....	42
4.2.3. Materiales compuestos.....	45
4.2.4. Aplicaciones.....	47

4.2.4.1. Sector aeroespacial.....	47
4.2.4.2. Sector automovilístico.....	48
4.2.4.3. Otras aplicaciones.....	50
4.3. Modelización numérica del comportamiento.....	51
4.3.1. Modelo termo-viscoplástico de Johnson-Cook.....	58
4.4. Ensayos de caracterización mecánica en polímeros.....	60
4.4.1. Ensayo de flexión en tres puntos.....	61
5. Simulación numérica del comportamiento.....	65
5.1. Mallado y condiciones de contorno.....	65
5.2. Modelización del comportamiento termo-viscoplástico.....	69
5.2.1. Modificación término T_H	73
5.3. Descripción del modelo analítico.....	77
5.4. Procedimiento de validación del modelo numérico.....	83
6. Análisis de resultados.....	91
6.1. Influencia de la temperatura de transición vítrea.....	91
6.2. Influencia de la velocidad y la temperatura inicial.....	94
6.2.1. Influencia de la velocidad de deformación.....	96
6.2.2. Influencia de la temperatura inicial.....	100
7. Marco regulador.....	101
8. Entorno socio-económico.....	103
8.1. Energía y contaminación.....	103
8.2. Seguridad.....	104

8.3. Medicina.....	104
8.4. Costes.....	105
9. Conclusiones y trabajos futuros.....	106
10. Anexos.....	108
10.1. Índice de tablas.....	108
10.2. Índice de gráficas.....	109
10.3. Índice de figuras.....	110
10.4. Índice de ecuaciones.....	112
11. Bibliografía y referencias.....	114

2. Resumen.

Las estructura ligeras, como los polímeros de alto peso molecular como el PEEK, son de creciente interés y estudio en algunos campos como el biomédico, donde las condiciones dinámicas del comportamiento mecánico son de vital importancia.

En el presente trabajo se ha desarrollado un modelo numérico de elementos finitos en el código comercial Abaqus/Explicit que permite realizar simulaciones de ensayo de flexión en tres puntos, simulando condiciones dinámicas.

El modelo numérico anterior ha sufrido un procedimiento de validación del mismo mediante un modelo analítico desarrollado en términos de la fuerza necesaria para la plastificación, definiendo el material mediante un modelo termo-viscoplástico de Johnson-Cook, en desarrollo para el PEEK.

Las condiciones dinámicas propuestas se han reproducido como diferentes velocidades de impacto del percutor y distintas temperaturas del material para las distintas simulaciones.

A partir del modelo numérico validado, se han realizado diversas simulaciones con el objetivo de determinar la ductilidad y la influencia de los parámetros de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook en el comportamiento dinámico del PEEK. Estos parámetros estudiados son la velocidad de deformación, la velocidad de impacto y las fuerzas inerciales del percutor, la temperatura inicial y la temperatura de transición vítrea del material.

Finalmente, en vista de los resultados obtenidos y de los estudios relacionados citados en el texto y la bibliografía, se ha propuesto una variación del término T_H , relacionado con el ablandamiento térmico, de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook.

Además, se ha realizado todo el estudio en vistas a las potenciales aplicaciones del PEEK como sustituto de estructuras ligeras tradicionales metálicas como el Al 2024-T3, todo ello enmarcado en el contexto socio-económico actual y teniendo en cuenta las demandas y necesidades de diversos sectores.

3. Introducción.

El estudio del comportamiento estructural de nuevas estructuras ligeras es uno de los mayores campos de investigación en la Mecánica de Medios Continuos. Entendiéndose por estructuras de materiales ligeros aquellas con una densidad relativamente baja con respecto a sus propiedades mecánicas.

Generalmente, se pueden clasificar en: aleaciones metálicas ligeras, polímeros de alto peso molecular y sus combinaciones formando los llamados materiales compuestos; tanto laminados como placas sándwich.

Las industrias más beneficiadas con la aparición de estos materiales son la aeroespacial, la automovilística y la biomédica, debido a que el peso de los materiales juega un factor determinante en el diseño. Esta reducción de peso, manteniendo las prestaciones mecánicas, permite en la mayoría de casos un ahorro de combustible y por lo tanto, presumiblemente, un ahorro en los costes.

El problema por lo tanto, radica en conseguir conocer lo mejor posible el comportamiento de estos nuevos materiales y valorar su verdadera aplicación.

3.1. Motivación.

Dentro de las estructuras ligeras, los polímeros de alto peso molecular son quizás aquellas menos desarrolladas en su campo estructural. Se conocen sus buenas propiedades mecánicas con suficiente precisión y ello ha despertado el interés de poder ser utilizado estructuralmente. Sin embargo, el comportamiento dinámico de alguno de ellos como el PEEK ha sido poco estudiado.

Concretamente, con el rápido avance de la medicina y toda la tecnología asociada a ella, el desarrollo de prótesis ha crecido y se ha extendido globalmente. Paralelamente a este desarrollo, se han investigado distintos materiales biocompatibles que desempeñen funciones estructurales en el cuerpo humano como prótesis o refuerzos. Estos primeros estudios determinaron la capacidad de aleaciones de aluminio y titanio de realizar esta función. Estos materiales cumplen los requisitos de biocompatibilidad, ligereza y buen comportamiento mecánico.

Con el avance de la investigación de las estructuras ligeras en otros campos, se han descubierto polímeros como el PEEK que presentan un comportamiento resistente elevado. El PEEK además es biocompatible y de muy baja densidad, condiciones idóneas para ser material de uso biomédico. Con respecto a las aleaciones de aluminio y titanio, se presenta como una posible solución más barata y reciclable.

Por todo ello, es de interés conocer y tener más información sobre el comportamiento del PEEK bajo condiciones dinámicas que predominan en las funciones de casi todas las prótesis biomédicas. A partir de estos estudios se determinará si el material es adecuado para soportar las sollicitaciones mecánicas manteniendo un comportamiento dúctil, como se espera según otros estudios como el llevado a cabo por Millett (Millett et al., 2006).

Conocer el comportamiento dinámico del PEEK no solo tiene aplicación biomédica, sino que su esperada ductilidad lo convierte en el material adecuado para protecciones en vehículos, cascos y material deportivo.

3.2. Objetivos y metodología.

Siguiendo la línea de lo expuesto anteriormente, con la aparición de nuevos materiales con altas propiedades mecánicas, se deben desarrollar estudios que definan correctamente el comportamiento mecánico de los mismos.

En este trabajo se estudiará el comportamiento dinámico del PEEK para determinar su capacidad de absorción de energía en aplicaciones protésicas. El estudio se basará en un ensayo de flexión en tres puntos. Para alcanzar este objetivo se ha realizado un proceso que consta de tres partes diferenciadas.

Primero, se modelizará numéricamente en un código comercial de elementos finitos (ABAQUS/EXPLICIT) diferentes configuraciones de flexión en tres puntos, a distintas velocidades de impacto y temperaturas del material, con el objetivo de determinar la dependencia de cada uno de estos efectos en el comportamiento mecánico en condiciones dinámicas del PEEK.

Una vez realizado el modelo numérico, es necesario validar el mismo, es decir, garantizar que el modelo representa fielmente la realidad y autoriza el uso de sus resultados. Esta validación se realizará en términos de la fuerza de impacto aplicada en la plastificación, comparando el modelo numérico con un modelo analítico, dada la ausencia de ensayos experimentales con esta configuración.

Por último, se realizarán distintos tipos de simulaciones para determinar la influencia de la temperatura de transición vítrea, la temperatura inicial del material y la velocidad de deformación, de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook, en el comportamiento mecánico del PEEK.

4. Estado del arte.

En los apartados siguientes se va a realizar una exposición de las características y propiedades de los distintos materiales que van a ser objeto de estudio en el trabajo.

Además ello va a estar enmarcado en los estudios previos sobre los mismos y los procesos y métodos llevados a cabo en investigaciones del ámbito del comportamiento dinámico de los materiales.

4.1. Comportamiento mecánico del PEEK y aplicaciones.

El trabajo aquí expuesto versa sobre un polímero biomédico determinado, el PEEK. Por ello se recogen en primer lugar las características generales de los polímeros.

Un polímero es toda aquella sustancia orgánica, natural o sintética, de elevado peso molecular, que se caracteriza por tener moléculas formadas por la repetición sucesiva de otras estructuras moleculares diferenciadas más pequeñas denominadas monómeros. Estos monómeros al enlazarse, constituyen los eslabones de una gran cadena, de tamaño variable que es denominado polímero.

Generalmente, la base sobre la que se articulan los monómeros es una combinación de Carbono-Hidrógeno (CH_x). Las distintas moléculas monómeros son el resultado de las múltiples combinaciones de esta base con otros elementos mediante enlaces químicos covalentes. En los polímeros no solo es determinante los elementos combinados si no también la estructura molecular espacial que presentan. Es tanto o más importante como se estructuran estas combinaciones con otros elementos que la presencia del elemento en sí. Esta característica está determinada por el tipo de enlace entre los elementos (simple, doble o triple).

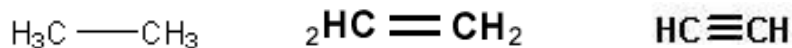


Figura 4.1. 1– Ejemplo de enlace simple, doble y triple; respectivamente de izquierda a derecha.

Además del tipo de enlace entre los elementos, es determinante la posición de los mismos en la cadena principal. La cadena principal de un polímero es aquella con la mayor sucesión de enlaces contiguos de entre todas las posibles. Generalmente esta cadena principal es la formada por las moléculas CH_x .

Al resto de cadenas que parten de la cadena principal se las denomina radicales, donde el número de los mismos y su estructura ramificada determinan directamente sus características.

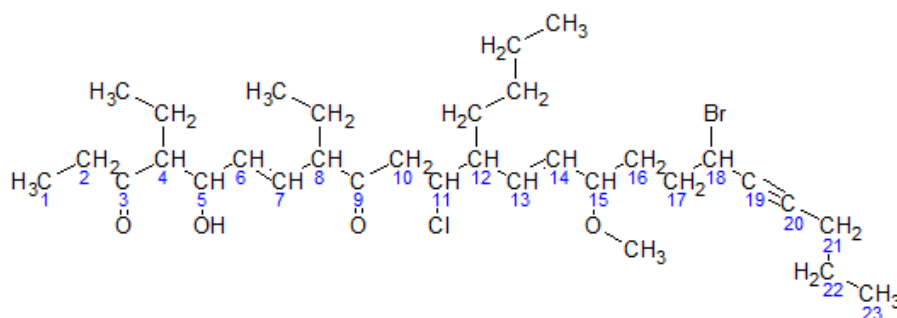


Figura 4.1. 2 – Ejemplo de estructura molecular polimérica con cadena principal y distintos radicales.

Una primera clasificación de los polímeros, atendiendo a su comportamiento mecánico, ligado directamente a su comportamiento frente a la temperatura se divide en polímeros termoestables y termoplásticos.

Los polímeros termoestables se caracterizan por descomponerse químicamente bajo altas temperaturas en vez de fluir. Este comportamiento se debe a una estructura molecular con alto grado de entrecruzamiento, es decir, numerosos enlaces covalentes. Por lo tanto, son sustancias infusibles a insolubles, por lo que no pueden ser reciclados ni reutilizados. En cuanto a las propiedades mecánicas, su comportamiento les infiere una alta estabilidad térmica, alta rigidez, resistencia a la deformación, ligereza y propiedades aislantes térmicas y eléctricas.

Por otro lado, los polímeros termoplásticos son aquellos que fluyen al ser calentados y vuelven a endurecer al enfriarlos, generalmente cambiando su forma, debido a su poco o ningún nivel de entrecruzamiento. Dentro de los polímeros termoplásticos existen diferencias en su comportamiento en función de las estructuras cristalinas del mismo. En esta clasificación se dividen en amorfos y semicristalinos.

La cristalinidad de un polímero se define como el grado de ordenación de los monómeros en su estructura interna, propiedad que determina en gran medida las características del compuesto. De tal forma que las zonas ordenadas se denomina zona cristalizada y la zona sin ordenar, amorfa. Los polímeros amorfos no presentan zona cristalizada. Además, tampoco tiene temperatura de fusión, solo una temperatura característica, la de transición vítrea (T_g) que produce el movimiento de las regiones amorfas. Sin embargo, los polímeros termoplásticos semicristalinos, aquellos que poseen zona cristalizada y zona amorfa, si presentan temperatura de fusión además de la de transición vítrea, que provoca el movimiento de la región cristalina del polímero. La temperatura de transición vítrea siempre es menor a la temperatura de fusión.

El grado de cristalinidad también determina la viscosidad del material y por lo tanto su comportamiento viscoplástico. Definida la viscosidad como la resistencia de un material a fluir, son polímeros más viscosos los amorfos que los semicristalinos ya que el desorden de sus cadenas dificulta el movimiento relativo de las mismas.

En cuanto a las propiedades mecánicas de los polímeros termoplásticos, la cristalinidad actúa como rigidizador del mismo ya que aumenta su grado de empaquetamiento y por lo tanto su densidad, módulo elástico y resistencia mecánica. En cambio, para todos los polímeros termoplásticos estas propiedades disminuyen conforme aumenta la temperatura del material. De manera general cabría esperar que en los polímeros semicristalinos se produjera una transición dúctil-frágil al alcanzar la temperatura de transición vítrea.

El comportamiento dúctil o frágil de un polímero o por lo general, de cualquier material, está relacionado con su modo de fallo. Un comportamiento dúctil implica que la rotura de un elemento sometido a esfuerzo mecánico no es un proceso repentino y rápido, sino que el material comienza un proceso de deformación plástica largo y detectable antes de la rotura del mismo, donde se precisa menor cantidad de energía que en la deformación. Sin embargo, la rotura frágil es un proceso rápido, repentino y generalmente catastrófico que fractura el material en pequeños trozos. La rotura frágil indica que el material rompe sin apenas deformación plástica. Se libera mayor cantidad de energía en la rotura que en la deformación previa y generalmente es difícil de controlar y tiene consecuencias destructivas, por lo que es totalmente evitable en aplicaciones estructurales donde la detección de indicios de fallo es fundamental.

4.1.1. Síntesis.

El PEEK, abreviatura de poliéter-éter-cetona, es un polímero orgánico termoplástico de la familia de los PAEK (poliarilétercetona) que engloba a termoplásticos semicristalinos estables a altas temperaturas, más de 300°C aproximadamente, y con una elevada resistencia mecánica y al daño por la acción química o radiactiva.

La característica química de los polímeros que más los distingue de los metales y cerámicos es su gran tamaño molecular. En el PEEK, la cadena de monómeros es del orden de 100 elementos con un peso molecular entre 80000-120000 g/mol. El PEEK se obtiene mediante polimerización por crecimiento en etapas por dialquilación de las sales de bifenolato. Reacción química mostrada en figura 4.1.3.

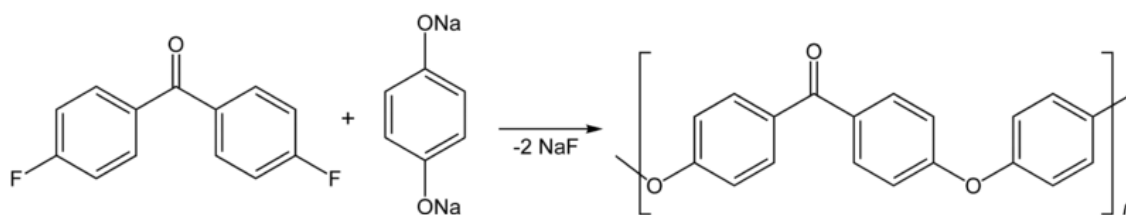


Figura 4.1. 3 – Representación esquemática de la reacción química cuyo resultado es PEEK.

Como perteneciente a la familia de los PAEK, la estructura química del PEEK también responde a una cadena principal de hidrocarburos aromáticos conectados mediante los grupos funcionales éter y cetona. También comparte con el resto de PAEK muchas de las principales propiedades de los mismos como la estabilidad a altas temperaturas, resistencia al daño por acción química o radiactiva, compatibilidad con agentes de refuerzo (como fibra de carbono o de vidrio) y una gran resistencia mecánica.

Ha de ser diferenciado de otros PAEK similares al PEEK, como el PEK o el PEKK, cuyas estructuras químicas se muestran a continuación en la figura 4.1.4.

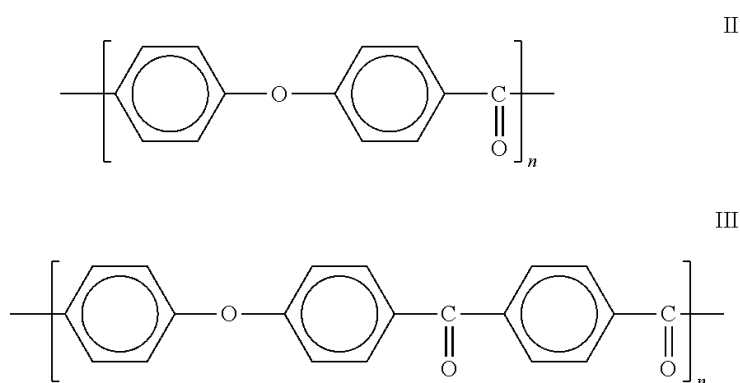


Figura 4.1. 4 – Estructura molecular del PEK (arriba) y del PEKK (abajo).

La molécula del PEEK es relativamente rígida debido a la presencia de bencenos en la cadena principal. Sin embargo, puede rotar axialmente sobre los enlaces de éter (-O-) o carbono-cetona (-CO-). Por lo tanto, la cadena principal no se mantiene estática, sino que vibra y rota debido a la energía térmica, como respuesta a las deformaciones externas que se apliquen, lo que le adquiere una gran deformabilidad.

Cuando en la polimerización del PEEK se enfría lentamente desde su estado fundido, la cadena molecular, rota sobre sí misma como se ha explicado anteriormente, se organiza y ordena formando cristales.

Estos cristales se encuentran, una vez solidificado, rodeado de regiones de la cadena que no ha conseguido cristalizar y que se denominan amorfos. De esta forma, la microestructura tiene dos fases diferenciadas; una amorfa y otra cristalizada, es decir, es semicristalino.

Paralelamente a muchos otros polímeros semicristalinos, el porcentaje de cristales en la molécula de PEEK depende del historial térmico durante su procesado. En PEEK moldeado por inyección, aparecen entre un 30% y 35% de cristales.

En general, la longitud y composición de la cadena del polímero determinará las propiedades del mismo, sobre todo su dependencia con respecto a la variación de temperatura y velocidad de deformación.

4.1.2. Propiedades.

a) Térmicas:

Como se ha expuesto en el punto anterior, las propiedades del PEEK, como todo aquel polímero, pueden variar en función del tipo y características del procesado. Por lo tanto, estas dependen directamente del grado de cristalización de la sustancia. El tamaño y la cantidad de cristales presentes son función de muchas variables como la temperatura y tiempo de procesado, la velocidad de enfriamiento local y de cualquier tratamiento posterior que se realice.

En cuanto a las propiedades térmicas, como cualquier otro polímero, el PEEK presenta tres temperaturas características o de transición: la temperatura de transición vítrea (T_g), la temperatura de fusión (T_m) y la temperatura de flujo (T_f).

La temperatura de transición vítrea, T_g , es aquella bajo la cual generalmente los polímeros semicristalinos se comportan como un material frágil y quebradizo. En estas temperatura inferiores a T_g , las cadenas del polímero no tiene suficiente energía térmica para deslizarse entre ellas, por lo que la respuesta ante esfuerzo mecánico se traduce en un estiramiento o rotura de los enlaces covalentes que constituyen la molécula. Para el PEEK, esta temperatura de transición vítrea es $T_g = 143^\circ\text{C}$. Sin embargo, el PEEK presenta un comportamiento sorprendentemente dúctil incluso a temperaturas por encima de T_g , capaz de tener elongaciones de hasta un 150%, dependiendo de su procesado y de las características del esfuerzo. Este hecho singular del PEEK, aunque no único, ha despertado el interés de estudio sobre el mismo y existen investigaciones sobre dicho comportamiento dúctil, como el de Millett (Millett et al., 2006).

Generalmente en los polímeros semicristalinos, a medida que aumentamos la temperatura por encima de T_g , se incrementa la movilidad de la zona amorfa del polímero. Si el polímero fue enfriado rápidamente durante su procesamiento desde su estado fundido, al sobrepasar la temperatura de transición vítrea, aparece una tendencia termodinámica a seguir formando cristales o recrystalizar, lo que lo convierte en un material más frágil. La manera en que este proceso se lleva a cabo, da información sobre cómo ha sido el procesamiento del polímero.

A pesar de ello y gracias a estudios como (Millett et al., 2006) se ha demostrado que no existe tal tendencia en el PEEK de recrystalizar y fragilizarse al sobrepasar la temperatura de transición vítrea. Cuando la temperatura sobrepasa este punto de recrystalización, los cristales más pequeños comienzan a fundirse.

Así, aumentando la temperatura, llegamos a la temperatura de fusión, $T_m = 343^\circ\text{C}$ para el PEEK, momento en el que prácticamente la totalidad del polímero se ha fundido. Esta temperatura refleja el tamaño de los cristales y su perfección de tal manera que, cristales grandes y bien formados proporcionan una temperatura de fusión más elevada que cristales pequeños.

Por último, aumentando la temperatura por encima de la temperatura de fusión, un polímero puede sufrir una transición a fluido, convirtiéndose en líquido. Para el PEEK, esta temperatura es $T_f = 390^\circ\text{C}$, temperatura a la cual se procesa el material.

Otro factor importante relacionado con la temperatura, es la capacidad del polímero de mantenerse estable a muy altas temperaturas, es decir, cómo se degrada. La degradación es el proceso por el cual un polímero puede comenzar a despolimerizarse o producirse otra reacción química alterna que modifique las propiedades mecánicas y químicas del material cuando se solidifique posteriormente. Además, se producen pérdidas de material en forma de gas de manera muy repentina una vez alcanzado esa temperatura. El PEEK empieza a degradarse a temperaturas muy elevadas, aproximadamente de 550°C .

b) Medioambientales.

Resistencia a la corrosión.

El PEEK no es atacado ni degradado en contacto con agua, agua de mar o vapor de agua, lo que lo convierte en un material idóneo para aplicaciones en componentes biomédicos, equipamiento sumergido o en válvulas.

Impermeabilidad.

Este polímero supone una gran barrera frente a la penetración de líquidos o gases. La solubilidad en ambientes líquidos o gaseosos, difusión y permeabilidad del PEEK es varios órdenes de magnitud menor que los polímeros normalmente utilizados. A pesar de que hay un aumento de la movilidad de las cadenas de la molécula cuando se aumenta la temperatura, la solubilidad de los gases se mantiene constante hasta la temperatura de transición vítrea, dónde además estas propiedades apenas empeoran.

El efecto sobre la permeabilidad del PEEK sometido a altas presiones es mínimo. Por ejemplo, aumentando 100 veces una presión aplicada, la permeabilidad aumenta 10 veces.

La baja solubilidad del PEEK, junto con su alto módulo de resistencia lo convierte inmune a la descompresión rápida.

Resistencia química.

Presenta una gran capacidad para mantener sus propiedades mecánicas cuando es atacado por una amplia gama de sustancias químicas a diferentes temperaturas.

La estructura molecular del PEEK es la que provoca que tenga gran resistencia química. Los hidrocarburos aromáticos (anillos) están interconectados mediante los éter y las cetonas, colocados en extremos opuestos del anillo, en la posiciones que químicamente se denominan “para”. La resonancia establecida en la estructura química del PEEK da lugar a una deslocalización de los electrones de los orbitales más externos a lo largo de toda la molécula, convirtiéndola en una molécula extremadamente no reactiva y, por lo tanto, resistente al daño por acción química.

Resistencia a la radiación.

Los polímeros termoplásticos sometidos a radiación electromagnética o de partículas ionizadas pueden fragilizarlo. Debido a la estabilidad energética del PEEK, este puede trabajar en ambientes con dicho tipo de acción sin perder propiedades mecánicas.

El estudio de la estabilidad radiactiva del PEEK comenzó hace dos décadas, gracias al interés por su posible aplicación en la industria aeroespacial, biomédica y nuclear. La degradación y rotura de enlaces en el PEEK sucede a partir de 10MGy. La industria aeroespacial y nuclear somete a sus materiales a dosis tres órdenes de magnitud más grande que la dosis aplicada en la industria biomédica (25-40kGy). Se ha demostrado que, para las dosis de la industria biomédica, no se aprecian apenas variaciones en el comportamiento mecánico del PEEK y del PEEK reforzado con fibra de carbono.

c) Mecánicas.

Como cualquier otro polímero termoplástico, las propiedades mecánicas del PEEK dependen, de manera general, directamente de la temperatura y de la velocidad de deformación aplicada. A su vez, este comportamiento mecánico también está definido por su tamaño molecular así como por la orientación y tamaño de las regiones cristalizadas.

A pesar de la relativa rigidez de su cadena molecular, el PEEK es un material con un comportamiento muy dúctil y presenta grandes deformaciones plásticas bajo tracción y compresión uniaxiales. A bajas deformaciones, menores del 3% aproximadamente, a temperatura ambiente, la relación entre tensión y deformación es lineal, cuya proporción se rige por el módulo elástico (E). Para el PEEK que será utilizado más adelante (PEEK 450G) este valor es **E = 3,7 GPa**.

Aumentando la deformación, a temperatura ambiente, llegamos a la tensión de plastificación, es decir, el PEEK entra en la zona plástica. La plastificación se produce, aproximadamente, a valores de tensión un 30-40% más altos en compresión que en tracción. Para el PEEK 450G, las tensiones de plastificación a tracción y compresión son las siguientes:

$$\sigma_y^{tracción} = 100 \text{ MPa} ; \sigma_y^{compresión} = 125 \text{ MPa}$$

Más allá de estos valores, el PEEK presenta un endurecimiento, conocido como endurecimiento por deformación. Cuando se supera el límite elástico, se producen movimientos de deslizamiento de dislocaciones o defectos de la microestructura del material que, al deformarse plásticamente, se vuelven irreversibles. El endurecimiento de un material, al deformarse plásticamente, es consecuencia de que los deslizamientos irreversibles de la zona plastificada dentro del material, limitan el deslizamiento de las zonas contiguas y por lo tanto, evitan este proceso, aumentando la dureza y propiedades mecánicas del material.

Este aumento de la dureza del material es efímero y, si se sigue aumentando la deformación, el material plastificará del todo, con su consecuente pérdida de propiedades y utilidad mecánica.

En relación al estudio de las aplicaciones ingenieriles del PEEK, cabe destacar que las propiedades mecánicas del mismo prácticamente se eliminan en casos con temperatura mayor de 250°C y se reducen notablemente a partir de 150°C aproximadamente, apenas después de alcanzar la temperatura de transición vítrea. Sin embargo, para la otra rama de posibles aplicaciones, la biomédica, esto no supone un problema ya que se diseñan para funcionar a la temperatura corporal, de 37°C aproximadamente, dónde el comportamiento mecánico del PEEK no es sensible a la temperatura.

Como se ha explicado anteriormente, el PEEK, al ser un polímero termoplástico, sus propiedades mecánicas no son solo función de la temperatura, sino también de la velocidad de deformación. En ensayos de compresión uniaxial, se ha comprobado que para aumentos de 7 órdenes de magnitud en la velocidad de deformación (de 10^{-4} s^{-1} , estado de carga cuasiestático; a 10^3 s^{-1} , carga de impacto) se produce un aumento del límite elástico del 30%. Esto es producido gracias a una serie de fenómenos termomecánicos que se dan lugar en ensayos de impacto con grandes velocidades de deformación, y que centran el interés de estudio en esta área. Algunos de estos fenómenos son: cambios en la estructura cristalina, calentamiento inducido por la deformación, decoloración macroscópica y la rotura y recuperación viscoelásticas.

Ya se ha comentado, en apartados anteriores relativos al PEEK, el hecho de que algunas propiedades del mismo varíen en función de la estructura cristalina. En cuanto a las propiedades mecánicas, el módulo de elasticidad, el límite elástico y el comportamiento plástico están fuertemente influenciados por la estructura cristalina de la molécula. Como la estructura cristalina refleja el historial del procesado de un polímero, cuando este se enfría desde su estado fundido, puede darse el caso que, al ser elementos con grosor considerable, el enfriamiento se lleve a cabo a distintas velocidades en las distintas capas del espesor. Este fenómeno provoca que, a su vez, las distintas capas tengan distinta estructura cristalina y por lo tanto, puede ser significativa la variación de propiedades en las mismas. De este modo, la capa más externa tendrá un nivel bajo de cristales ya que se ha enfriado muy rápidamente y las capas más interiores estarán más cristalizadas.

Otro hecho importante que concierne a las propiedades y que es estudiado, es la tribología del PEEK o cómo interactúa en contacto con otras superficies, que pueden ser del mismo o distinto material, con movimiento relativo bajo cargas aplicadas. Las propiedades que estudia la tribología son la fricción y el desgaste. En general, el desgaste se divide en tres tipos: fatiga superficial, el desgaste abrasivo y desgaste adhesivo; y pueden hacer una superficie más suave o rugosa. Cuanto menor sea la velocidad de desgaste, mayor será la resistencia a desgaste del material, entendiendo velocidad de desgaste como la velocidad de pérdida de material de la superficie en contacto. Esta velocidad de desgaste depende de la relación velocidad del movimiento en las superficies de contacto y presión.

Paralelamente al desgaste, la fricción se define como la resistencia al deslizamiento entre dos superficies en contacto. Se mide mediante el conocido coeficiente de fricción o rozamiento (μ) adimensional, que varía en función de la velocidad, presión, temperatura, lubricación, rugosidad y naturaleza de las superficies en contacto. Además, la fricción provoca un calentamiento en la zona de contacto que se convierte en un aumento de temperatura localizado.

Si esta temperatura aumenta por encima de la temperatura de transición vítrea del polímero, consecuentemente la velocidad de desgaste aumenta, el material se vuelve más débil.

Como resumen de todas las propiedades mecánicas descritas, a continuación se presenta una tabla con las más importantes:

PEEK 450G									
Propiedad	Resistencia tracción ($\sigma_{y,t}$)	Resistencia compresión ($\sigma_{y,c}$)	Módulo elasticidad (E)	Coefficiente Poisson (ν)	Densidad (ρ)	Temperatura fusión (T_{melt})	Temperatura transición (T_g)	Fracción de trabajo plástico (β)	Calor específico (C_p)
Unidad	MPa	MPa	GPa	-	kg/m ³	°C	°C	-	J/kg·K
Valor	100	125	4.1	0.4	1320	343	143	0.9	220

Tabla 4.1. 1 – Propiedades mecánicas del PEEK a 23°C (Viktrex).

4.1.3. Materiales compuestos.

La mejora en el rendimiento y la creciente necesidad de reducir costes, cumpliendo las estrictas regulaciones medioambientales, desafían a todas las industrias. La necesidad en la garantía y durabilidad, costes de fabricación más reducidos, menor peso y respetabilidad con el medioambiente de los materiales, son la clave de la aparición, desarrollo y estudio de los materiales compuestos y sus aplicaciones.

El PEEK puede ser combinado con otros materiales para formar lo que se conoce como un material compuesto. Un material compuesto es todo aquel que tiene dos o más partes diferenciadas (una funciona como matriz y la otra como refuerzo), cada una con unas propiedades físicas y mecánicas características, con un punto o zona de unión denominado interfase y que actúan como uno solo. Las propiedades mecánicas del conjunto dependen de las propiedades individuales de los componentes y de la interfase, normalmente mejores, en general o en algún determinado aspecto, que las de sus componentes por separado. Generalmente, el refuerzo es el encargado de resistir las sollicitaciones mecánicas y la matriz de transmitir la carga entre las fibras, mantenerlas orientadas y protegerlas frente a desgaste exterior.

En el caso del PEEK, el polímero es típicamente diseñado como la matriz y constituye la mayor parte de volumen del material compuesto, que en este caso de denominaría Material Compuesto de Matriz Polimérica (MCMP). Los refuerzos más utilizados para formar materiales compuestos con el PEEK son la fibra de carbono y la fibra de vidrio, denominados CFR-PEEK (carbon fiber reinforced PEEK) y GFR-PEEK (glass fiber reinforced), respectivamente.

El objetivo de añadir estos refuerzos es aumentar su dureza y resistencia y este aumento depende del tamaño, longitud y orientación de las fibras en la matriz.

De manera global ofrecen, gracias a sus altos valores de dureza y resistencia, soluciones alternativas a los metales y aleaciones metálicas tradicionales con una importante reducción de peso. El PEEK y sus materiales compuestos ofrecen un amplio rango de posibles comportamientos mecánicos a elegir, lo que ha aumentado el interés por conocer las propiedades de estos materiales compuestos en los últimos años e incurriendo en los principales problemas y fenómenos más sensibles que rigen estas distinciones en las propiedades como la micromecánica de la matriz y de la interfase en presencia de las fibras reforzadoras.

Así pues, se presentarán las distintas posibilidades de refuerzos en el PEEK y sus respectivas propiedades.

a) Reforzado con Fibras de Carbono (CFR).

El PEEK reforzado con fibra de carbono presenta diferentes configuraciones. Las fibras de carbono pueden estar alineadas unidireccionalmente a lo largo de un eje, que coincidirá con la dirección de la tensión principal y resultando una gran respuesta mecánica en esa dirección; o bien distribuidas en varias direcciones, es decir, orientadas en distintos ángulos en cada capa, que ofrece un comportamiento mecánico más equilibrado en todas las direcciones.

Una de las mayores ventajas del CFR PEEK es la flexibilidad que ofrece en cuanto a su diseño. La orientación de las fibras, su concentración y composición pueden ser ajustadas libremente para cubrir las necesidades de la aplicación y uso que se le quiera dar a cada una de las piezas, variando ligeramente las propiedades en cada caso.

En cuanto a la fabricación, esta puede ser llevada a cabo de diversas formas, donde la diferencia en las mismas suele estar orientada en los distintos métodos de colocación el refuerzo en la matriz. Los materiales compuestos de matriz polimérica como el CFR PEEK pueden ser fabricados por procesos de molde abierto o de molde cerrado.

Los procesos de molde abierto incluyen la unión manual, la bolsa de vacío en autoclave y el bobinado de filamentos. Por su parte, los procesos de molde cerrado engloban la inyección, laminación y pultrusión o extrusión, siendo estos procesos de molde cerrado los más comunes para el caso del PEEK con fibra de carbono.

Cuando el PEEK se refuerza con fibra de carbono disminuye ligeramente el punto de fusión del material, en función del porcentaje de fibras.

Las propiedades mecánicas del PEEK, cuando se refuerza con fibra de carbono, mejoran en cuanto a dureza y resistencia. El comportamiento dinámico a fractura cuando se refuerza con fibra de carbono es superior que siendo reforzado con fibra de vidrio y que el PEEK puro. El estudio de propagación de grietas y de fatiga del CFR PEEK, desde el punto de vista de la mecánica de la fractura, es complejo e involucra directamente a la interacción entre fibra y matriz. La incorporación de láminas de materiales compuestos de fibra de carbono añade complejidad al estudio de la respuesta estructural bajo cargas dinámicas. Además, reduce el desgaste y el coeficiente de fricción con respecto al PEEK puro.

A continuación se muestra una tabla comparativa entre los valores de las propiedades mecánicas del PEEK 450G reforzado con un 30% de fibra de carbono y del PEEK 450G sin reforzar a 23°C:

Propiedad	Unidad	PEEK 450G	PEEK 450CA30
Resistencia tracción ($\sigma_{y,t}$)	MPa	100	224
Resistencia compresión ($\sigma_{y,c}$)	MPa	125	240
Módulo elasticidad (E)	GPa	4.1	20.2
Coefficiente Poisson (ν)	-	0.4	0.44
Densidad (ρ)	kg/m ³	1320	1400
Temperatura fusión (T_{melt})	°C	343	343
Temperatura transición (T_g)	°C	143	143
Fracción trabajo plástico (β)	-	0.9	0.9
Calor específico (C_p)	J/kg·K	220	185

Tabla 4.1. 2 – Comparativa de las propiedades mecánicas del PEEK 450G (sin refuerzo) y del PEEK 450CA30 (30% fibra de carbono) a 23°C (Vitrex).

Dada su versatilidad, el CFR PEEK tiene numerosas aplicaciones ingenieriles dónde las restricciones de peso son importantes pero se debe mantener una buena respuesta mecánica. Las principales industrias que necesitan este tipo de material son la aeroespacial, la automovilística y la biomédica. En este último punto, el CFR PEEK además aporta otras características que lo hacen único.

Aparte de su ligereza y resistencia, al ser no metálico, es transparente a las radiografías y técnicas de imagen que se realizan en implantes en seres humanos. De esta forma, lo convierte en un sustituto idóneo a los implantes metálicos ya que permite ver con claridad cuando se realizan diagnósticos por imagen en cuerpos, manteniendo e incluso mejorando la respuesta mecánica del implante. Todo esto no sería posible si el CFR PEEK no fuese biocompatible. Sin embargo, el CFR PEEK es biocompatible y mantiene los niveles toxicológicos permitidos de cualquiera de las maneras que el polímero sea formulado o procesado.

Además, no produce filtraciones por lo tanto no afecta a la salud biológica del paciente y ha sido demostrada su durabilidad en implantes a largo plazo. El estudio de las fibras de carbono en uso clínico se remonta a hace 20 años, con lo cual, su biocompatibilidad está más que probada. Sin embargo, al fragilizarse con las fibras de carbono, lo convierte en más probable a tener la peligrosa rotura frágil en un implante.

b) Reforzado con fibra de vidrio (GFR).

La configuración del PEEK reforzado con fibra de vidrio es similar a la reforzada con fibra de carbono. Pueden presentar también distintas orientaciones tamaño y distribución de las fibras, que repercutirá en distintas maneras de comportarse antes esfuerzos mecánicos.

La fibra de vidrio, en comparación con la fibra de carbono, es más rígida, dura y frágil, por lo que el GFR-PEEK heredarán estas propiedades en comparación al CFR-PEEK. Estas características lo harán más conveniente que el CFR-PEEK en un determinado tipo de aplicaciones y viceversa. Sin embargo, ambos refuerzos mantienen la línea común de reducir peso con un aumento o, como mínimo, mantenimiento de las propiedades mecánicas.

Al ser el GFR-PEEK un material frágil, es óptima su implantación en aplicaciones en las que se requieren alta resistencia y rigidez pero en sistemas de cargas estáticos, en comparación con el CFR-PEEK que se utiliza en ambientes de carga dinámica.

Los métodos de procesado y fabricación son también similares a los del CFR-PEEK ya que ambos se presentan como refuerzos en fibras.

Cuando el PEEK se refuerza con fibra de vidrio también disminuye ligeramente el punto de fusión del material, en función del porcentaje de fibras, resultando una temperatura menor que cuando es reforzado con fibra de carbono.

En cuanto a las propiedades mecánicas, reforzar el PEEK con fibra de vidrio también reduce el desgaste y el coeficiente de fricción con respecto al PEEK puro, si bien no tanto como cuando es reforzado con fibra de carbono.

A continuación se muestra una tabla comparativa entre los valores de las propiedades mecánicas del PEEK 450G reforzado con 30% de fibra de vidrio, reforzado con 30% de fibra de carbono y del PEEK 450G sin reforzar:

Propiedad	Unidad	PEEK 450G	PEEK 450CA30	PEEK 450GL30
Resistencia tracción ($\sigma_{y,t}$)	MPa	100	224	156
Resistencia compresión ($\sigma_{y,c}$)	MPa	125	240	215
Módulo elasticidad (E)	GPa	4.1	20.2	9.7
Coeficiente Poisson (ν)	-	0.4	0.44	0.45
Densidad (ρ)	kg/m ³	1320	1400	1510
Temperatura fusión (T_{melt})	°C	343	343	343
Temperatura transición (T_g)	°C	143	143	143
Fracción trabajo plástico (β)	-	0.9	0.9	0.9
Calor específico (C_p)	J/kg·K	220	185	171

Tabla 4.1. 3 – Comparativa de las propiedades mecánicas del PEEK 450G (sin refuerzo), del PEEK 450CA30 (30% fibra de carbono) y del PEEK 450GL30 (30% fibra de vidrio) a 23°C (Victrex).

Las propiedades mecánicas del PEEK con los refuerzos de fibra de carbono y fibra de vidrio están todavía siendo investigados y es un punto de interés actual en el estudio del PEEK.

Por lo general, el GFR-PEEK, aunque también es biocompatible, no se utiliza en aplicaciones médica tanto como el CFR-PEEK debido a su baja ductilidad y su mala respuesta a cargas cíclicas o dinámicas. Por lo general, agregar refuerzos de fibras rígidas al PEEK, provoca un decrecimiento en la resistencia a impacto del polímero, aumentando la fuerza máxima admitida pero disminuyendo dramáticamente el módulo de elasticidad y la energía a rotura (Sinmazçelik et al., 2007).

Los materiales compuestos de matriz de PEEK con refuerzos de fibra de vidrio son más baratos que reforzados con fibra de carbono.

Aparte de los materiales compuestos de tipo matriz con refuerzo de fibras explicados anteriormente, también existe otro tipo de materiales compuestos en los que el PEEK puede jugar un importante papel con mejoras globales en las propiedades.

Se trata de los materiales compuestos de tipo sándwich. Consisten en materiales formados por tres capas y como mínimo dos materiales distintos. Con esta combinación de materiales en las distintas capas podemos diseñar materiales con propiedades específicas para satisfacer las necesidades de las estructuras modernas, ya que podemos combinar con cada material, características propias de los mismos. La estructura del material sándwich consiste en tres capas de material donde las exteriores se denominan pieles y suelen ser del mismo material, y la interior se denomina núcleo.

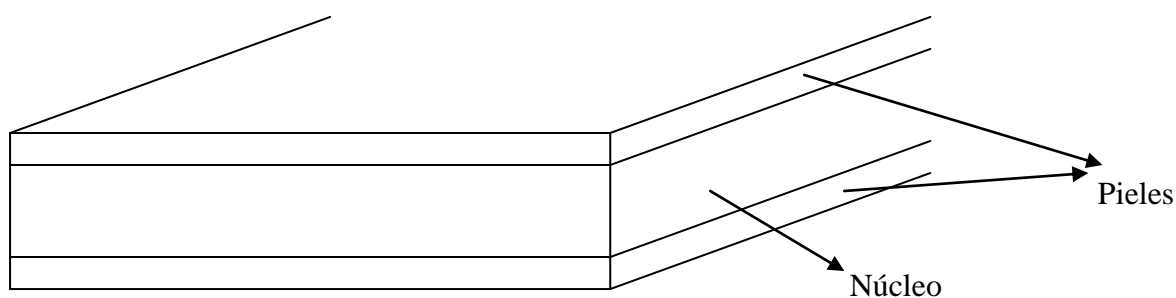


Figura 4.1. 5 – Esquema de la composición de una placa sándwich.

El material de las pieles suele ser metálico, o un material con alta resistencia, siendo el principal agente resistente ante las sollicitaciones mecánicas y protegiendo la integridad del núcleo, mientras que el núcleo suele ser un polímero termoplástico ligero, que mantiene la separación entre las pieles, absorbe las tensiones de cortadura y amortigua las cargas por impacto.

El PEEK adquiere la función de núcleo en este tipo de materiales compuestos y puede presentarse en su estado puro o reforzado con fibra de carbono o de vidrio. Los materiales más utilizados para las pieles son el aluminio, el titanio y el acero. El objetivo de los materiales tipo sándwich es aumentar el espesor, por lo tanto la resistencia, sin aumentar demasiado el peso total del material.

El mayor problema de integridad que encontramos en este tipo de materiales es la unión entre las distintas capas y como ésta afecta al comportamiento del material. Una mala adhesión entre capas se traduce en una rotura del material o pérdida de las propiedades con las que se diseñó, debido a un efecto llamado delaminación. Se trata de un aspecto muy importante ya que del tipo de adhesión depende significativamente el procesado y las propiedades mecánicas del material. Además, a veces es necesario también un tratamiento superficial en la superficies que van a estar en contacto para mejorar la adhesión posterior entre las mismas. Este tratamiento variará en función del tipo de adhesión que se quiera realizar. La adhesión entre capas puede ser llevada a cabo mediante diversas técnicas que se clasifican en mecánicas, químicas y físicas.

- Mecánicas: la unión depende únicamente de la rugosidad y morfología de las superficies que provoca que queden ancladas entre sí.
- Químicas: basada en reacciones químicas entre el adhesivo y el adherente.
- Físicas: basada en las fuerzas interactivas de atracción y repulsión atómica entre los materiales en contacto.

Como se explica en las uniones químicas, a veces es necesaria la utilización de un agente adhesivo que se aplique entre las superficies de los materiales en contacto para hacer ésta adhesión más fuerte o cuando no es posible la autoadhesión entre las mismas. Uno de los agentes adhesivos más utilizados es la resina epoxi.

Los métodos de fabricación y procesado de los materiales compuestos tipo sándwich deben ser adaptados para mantener las propiedades que se han diseñado para el material. El método más utilizado es la unión por laminación (roll-bonding) ya que permite fabricar láminas continuas en condiciones constantes y reproducibles. Generalmente este proceso consta de dos pasos, el primero en el que se preparan las láminas metálicas y se las impregna de la resina adhesiva, en caso de que se utilice; y el segundo el que se hace pasar estas placas a través de unos rodillos y uniéndose al polímero del núcleo.

Aunque las propiedades individuales de los materiales que forman un material tipo sándwich se conocen con seguridad, el estudio de cómo se comportan en conjunto es objeto de estudio desde su aparición. A raíz de estas investigaciones se formuló la regla de las mezclas para determinar las propiedades de los materiales tipo sándwich a partir de las de sus componentes.

$$\sigma_{yS} = \sigma_{yA}V_A + \sigma_{yB}V_B \quad [1]$$

Donde σ_y es el límite elástico del material V la fracción de volumen de cada componente en el total de la lámina y los subíndices S, A y B se refieren al material final y los distintos componentes, respectivamente.

Esta misma regla puede ser modificada para dejarla en función del módulo elástico:

$$\begin{aligned}\sigma_{yS} &= \sigma_{yA}V_A + \sigma_{yB}V_B \rightarrow \varepsilon E_S = \varepsilon E_A V_A + \varepsilon E_B V_B \\ E_S &= E_A V_A + E_B V_B\end{aligned}\quad [2]$$

Queda demostrado por lo tanto que, las propiedades del sándwich dependen directamente de las propiedades del metal, del polímero y de la unión entre ellos. A pesar de la gran diferencia entre las propiedades de polímeros y metales, sobre todo en resistencia y ductilidad, las propiedades finales del material compuesto estarán comprendidas en un rango intermedio entre las propiedades de cada componente.

El desarrollo de materiales híbridos como las placas sándwich es uno de los ejemplos del éxito de los materiales compuestos. Se ha demostrado su potencial en la posibilidad de diseñar materiales que cumplan requerimientos muy específicos que los componentes por sí solos no pueden conseguir.

Al combinar materiales con propiedades totalmente distintas como los metales y los polímeros, podemos conseguir altos valores de resistencia mecánica al mismo tiempo que una gran ligereza, resistencia a impactos, aislamiento y protección contra la corrosión.

Las debilidades de estos materiales, como se ha expuesto anteriormente, estriban en la buena adhesión y funcionamiento de la interfase metal-polímero.

Las aplicaciones de los materiales tipo sándwich son muy amplias y tienen las mismas características que en el caso del PEEK reforzado con fibras, aplicaciones en las que la reducción de peso es crucial siempre que se mantengan las propiedades mecánicas. Tienen un gran potencial en la automoción, construcción, industria naval y aeroespacial, ya que son industrias que necesitan cumplir unos estrictos requisitos medioambientales y de sostenibilidad. Además, su fabricación en continuo por laminación lo convierte en sustituto idóneo de placas metálicas en industrias de fabricación en serie como la automovilística, con su consecuente reducción de costes.

4.1.4. Aplicaciones.

4.1.4.1. *Sector aeroespacial.*

Para cubrir las cada día más estrictas restricciones en consumo y contaminación, la industria aeroespacial necesita nuevos materiales ligeros, que ofrezcan flexibilidad en el procesado, reduzcan los costes de fabricación y aseguren durabilidad en ambientes agresivos. El polímero PEEK es un exitoso candidato a sustituir metales, tradicionales materiales compuestos de matriz termoestable y otros plásticos, en un creciente número de aplicaciones aeronáuticas. Su excepcional resistencia mecánica, resistencia a la fluencia y la corrosión, buenas propiedades ante la acción del fuego y facilidad para ser fabricado cumpliendo ajustadas tolerancias sirven de pilares que sostienen este cambio.

De manera más genérica, el PEEK consigue una importante reducción de peso manteniendo las exigencias mecánicas. A modo de comparación directa, los siguientes puntos se postulan como principales beneficios de la utilización del PEEK en lugar de elementos metálicos:

- Reducción del 70% de peso con el acero, del 55% con el titanio y el 44% con el aluminio, con iguales valores de rigidez y resistencia.
- Se podrían ahorrar 5 millones de dólares en combustible y 17.000 Tm de emisiones de CO₂ a la atmósfera anualmente, con reducir 45kg en cada aeronave de una flota de 500 aviones.
- Posibilidad de combinarlo con fibra de carbono y de vidrio consiguiendo 5 veces más resistencia que el acero, y 4 veces más que el titanio y aluminio.
- El moldeo por inyección típico de la fabricación del PEEK, permite simplificar y estandarizar piezas funcionales.
- Menos piezas y más fáciles de colocar y ensamblar, con una reducción de hasta un 75% en costes y tiempos de ensamblaje.
- Material totalmente reciclable.
- No pierde propiedades mecánicas hasta después de 5.000 horas tensionado sin deformación a 260°C.
- Excelente resistencia al combustible, fluidos hidráulicos, anticongelantes, insecticidas, líquidos de limpieza, extintores, agua, sal y humo.
- Reducción de los niveles sonoros, gracias a su capacidad amortiguadora de las vibraciones.

Han sido ya introducidos en aeronaves de uso militar y comercial por las principales marcas constructoras como Airbus, Boeing, COMAC, FAA y Military, que ya han desarrollado especificaciones para el uso del PEEK.

Las piezas realizadas con PEEK pueden incluirse tanto en las zonas presurizadas como las que no lo están, y formar parte en los motores y engranajes, en el interior y exterior de la nave.

- **Motores y engranajes:**
El punto clave que permite que el PEEK sea un sustituto viable en componentes mecánicos de transmisión y motores es su capacidad para soportar altas temperaturas y buen comportamiento a desgaste y fricción, como se ha explicado en apartados anteriores.
- **Exterior:**
Al igual que en el punto anterior, es necesario que las piezas que están en contacto con el exterior, como las placas exteriores del fuselaje, el radomo y las alas, necesitan tener bajos índices de desgaste, debido a lluvia y partículas suspendidas en el aire, y de corrosión. El PEEK presenta solo menor desgaste que las cerámicas y las aleaciones metálicas especiales. Además, también es necesario un buen comportamiento frente a impacto, que en el caso del PEEK se estudiará más profundamente más adelante en este trabajo. Ya se fabrican soportes estructurales hechos de PEEK como costillas, largueros y larguerillos.
- **Interior:**
El comportamiento mecánico y la ligereza del PEEK lo convierten en material idóneo para el interior de las aeronaves en componentes como el suelo de la cabina de pasajeros, mamparos verticales, estructuras de las baterías, apoyos de los tubos del combustible, sistemas de sujeción y cortafuegos. El Boeing 787 ya está implantando abrazaderas de tuberías y cables hechos de este material, reduciendo un 20% el peso, un 30% los tiempos de instalación y eliminando los tratamientos anticorrosión con respecto a las fabricadas en aluminio.
También se han sustituido los fijadores, tuercas, tornillos y anclajes que sustentan componentes críticos, sin reducir su seguridad y reduciendo en un 80% el peso y mejorando la respuesta a la corrosión y vibración.
Fuera de las especificaciones mecánicas, el PEEK también se utiliza en las aeronaves como agente aislante térmico y acústico, protegiendo el interior de las condiciones externas.

A continuación se detallan algunas de las funciones que pueden formar parte el PEEK en una aeronave:

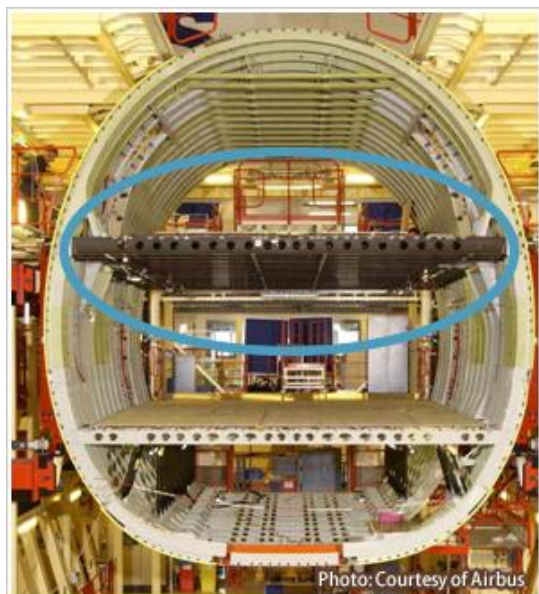


Figura 4.1. 6 –Suelo de cabina de pasajeros de una aeronave.

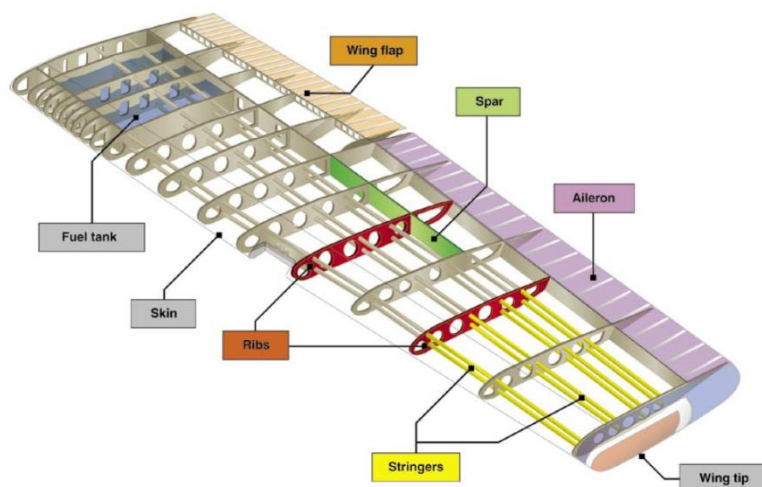


Figura 4.1. 7 – Distintas partes del ala de una aeronave.

4.1.4.2. Sector automovilístico.

La industria automovilística está globalmente regida por estándares medioambientales y de seguridad, que hacen que se necesiten materiales más longevos que garanticen la calidad y reduzcan los costes de producción. Además, los consumidores demandan productos que necesiten menos frecuencia de revisiones de mantenimiento, experiencias de conducción cada vez más cómodas y mayor eficiencia en consumo de combustible. Todo ello, obviamente, sin que se convierta en un deterioro de las prestaciones.

Reducir el peso del vehículo, conducido por el deseo de disminuir las emisiones de CO₂ a la atmósfera y mejorar el consumo, da lugar a la minimalización de los componentes e integración funcional, convirtiéndose en la vanguardia de las investigaciones y esfuerzos de la industria de la automoción. De esta forma, se trata de encontrar materiales que presenten un aumento en la eficiencia y prestaciones, ofrezcan alta resistencia mecánica y poco peso, para que estas soluciones se conviertan en una ventaja económica para el sector.

La demanda de componentes reducidos a menor tamaño, siguiendo la tendencia anteriormente descrita, provoca que los mismos necesiten tener aún mejor respuesta ante altas temperaturas de trabajo. Los estándares actuales del sector dictaminan que los materiales necesitan funcionar correctamente a temperaturas de 150°C o incluso más, dependiendo de la aplicación concreta, mientras que hace unos años esta temperatura tenía que ser de 100-120°C.

Hoy en día, los fabricantes buscan materiales que puedan soportar 180°C en las piezas de transmisión y dirección y de 220°C en el turbocompresor. Este hecho deja en evidencia el hecho de que utilizar metales y plásticos convencionales deja de ser una opción, ya que pierden sus propiedades mecánicas con temperaturas alrededor de 200°C. Sin embargo, el PEEK se yergue como uno de los principales candidatos a sustituir estos materiales tradicionales ya que no sufre cambios en el comportamiento mecánico a más de 150°C, y mantiene su funcionalidad hasta después de 5000 horas de trabajo a 260°C.

Otra de las principales características que convierten al PEEK en un material idóneo, es su gran resistencia a desgaste y bajo coeficiente de fricción, que permite realizar piezas de engranajes y del motor que están continuamente en contacto y movimiento relativo.

Las principales áreas de aplicación de piezas de PEEK son las siguientes:

- Bombas hidráulicas y de vacío:
Puede utilizarse en bombas de paletas rotativas, bombas de engranajes y bombas centrífugas, ofreciendo una reducción de consumo de energía debido a un menor momento de inercia, hasta un 70% de ahorro en peso, hasta un 10% menos de potencia requerida, un ahorro de entre el 1 y el 2% de combustible, mayor vida, menos vibraciones y ruido.
- Arandelas, juntas y casquillos:
Ya han sido sustituidas las metálicas y de teflón (PTFE) por PEEK, con las siguientes ventajas: mayor garantía de operación incluso en condiciones extremas, menor densidad y momento de inercia que conduce a un menor consumo de energía, reduce la fricción que da lugar a una reducción de emisión de CO₂, gran resistencia a fluencia bajo compresión, permite utilizar aceites a mayor presión, 40% menos filtraciones y menos operaciones de mantenimiento.
- Válvulas hidráulicas:
El PEEK puede sustituir las válvulas de asiento de acero, que pueden ser cónicas o de bola, ofreciendo gran resistencia a fatiga, a fluencia a largo plazo, menores filtraciones, menor desgaste y coeficiente de fricción y ajustable a estrictas tolerancias.
- Engranajes:
Los engranajes son piezas complejas ya que soportan cargas de varios tipos y direcciones en combinación. El correcto funcionamiento de los mismos depende de un buen comportamiento tribológico y mecánico, resistencia a ambientes agresivos, durabilidad, resistencia al calor y precisión dimensional.

Está demostrado que el PEEK cumple estos requisitos mejor que otros polímeros e incluso metales, mejorando la resistencia mecánica y a fatiga a altas temperaturas, con alta rigidez y dureza, flexibilidad en el diseño, ya que se pueden fabricar por inyección en molde con gran precisión, deslizamiento más suave que hace que los niveles sonoros disminuyan 3dB y se reduzca en un 9% el par motor necesario para operar. Por ejemplo, la empresa Metaldyne fabrica sus ejes de equilibrado de PEEK 450G, sustituyendo a los metálicos.



Figura 4.1. 8 – Engranaje hecho en PEEK.

- Rodamientos:
Utilizar el PEEK como el material para la carcasa de los rodamientos conlleva una reducción en el consumo, una mayor longevidad bajo malas condiciones de lubricación y menor ruido.
- Componentes eléctricos:
Con la introducción de vehículos híbridos y eléctricos, se necesitan mayores sensores y cableado. El PEEK es un material ideal para los anclajes y carcasas de los mismos.
- Aislamiento:
Láminas aisladoras de PEEK también son utilizadas en el sector. Presentan niveles de absorción y permeabilidad de agua mejores que las de poliimida (PI) y polietilnimina (PEI).
- Recubrimientos:
Aplicados a diversas superficies metálicas, consigue reducir el coeficiente de fricción y mejorar la resistencia a la temperatura y a agentes químicos. Tiene uno de los valores más bajos de desprendimiento de sustancias volátiles de los recubrimientos del mercado.

- Carenado y carrocería:

Es una de las principales líneas de investigación, depende del comportamiento del PEEK frente a impacto y absorción de energía. La sustitución de piezas metálicas por PEEK en este aspecto podría reducir cuantiosamente el peso total del vehículo. El comportamiento frente a impacto del PEEK se estudiará en los siguientes apartados.

4.1.4.3. Sector biomédico.

Gracias a la capacidad de combinar características como resistencia mecánica, ligereza, estabilidad a altas temperaturas y a reacciones químicas que presenta el PEEK, se ha convertido en un material idóneo para utilizar en medicina como implantes y también formando partes de los complejos aparatos utilizados en este campo.

Además de estas características, al ser el PEEK un material inerte, soporta los agresivos métodos de esterilización a los que se someten los aparatos médicos en hospitales y laboratorios de todo el mundo, utilizando fuertes agentes químicos, altas presiones y dosis radiactivas. Soporta 2500 horas bajo esterilización con vapor de agua a alta presión sin que las propiedades químicas o mecánicas varíen. La introducción del PEEK en sustitución del acero inoxidable, aluminio y titanio en los aparatos médicos ha supuesto toda una revolución ya que se tenía por supuesto que los plásticos no podían desempeñar esas funciones. Desde su introducción en el sector, se ha convertido en el material elegido para aplicaciones que requieren resistencia química, a la temperatura, al vapor, a la radiación, al desgaste y a métodos de esterilización agresivos, como por ejemplo:

- Sistemas de administración:

Tubos, catéteres, gestión de la sangre, administración de medicamentos, diálisis; sustituyendo a PVC, alquenos, poliéster y uretanos.

- Equipamiento médico:

Carcasas, engranajes, casquillos, válvulas, equipo de esterilización, bombas y motores; sustituyendo a plásticos, metales y vidrios.

- Artefactos dentales y quirúrgicos:

Endoscopias, laparoscopias, electrocirugía, herramientas dentales y quirófanos; sustituyendo a metales y elastómeros.

- Instrumentación química y analítica:

Cromatografía, test químicos y manejo de sustancias con riesgo para la salud; sustituyendo a acero inoxidable, PVC y uretanos.

A pesar de ser un material utilizado en instrumentación médica, el mayor campo de investigación se centra en la utilización del PEEK como implante en cuerpos humanos. Antes de poder utilizar un implante hecho de cualquier material, es necesario estudiar su biocompatibilidad, es decir, la capacidad del material de no perjudicar el correcto funcionamiento del cuerpo en el que se aloja.

Las primeras investigaciones sobre la biocompatibilidad de los materiales surgió en los años 80. Desde su aparición, el PEEK puro y reforzado con fibra de carbono ha sido sometido a diferentes exámenes para acreditar el cumplimiento de los criterios dispuestos de biocompatibilidad. Estos exámenes incluyen estudios sobre toxicidad sistemática e intercutánea y sobre implantación intramuscular. Todos ellos no han mostrado efectos secundarios adversos. Además, los exámenes de sensibilización siguiendo la normativa ISO 10993-10-1995 no muestran efectos sensibles sobre el cuerpo y los exámenes de toxicidad genética no resultan en alteraciones cromosómicas.

Los exámenes de toxicidad realizados se han llevado a cabo mediante técnicas de cultivo celular en contacto con el PEEK. Los estudios tóxicos y citotóxicos de PEEK puro y reforzado con fibra de carbono (incluido el 450G) se llevaron a cabo en animales, resultando perfectamente compatibles en todos ellos. Más tarde se estudiaron cultivos de osteoblastos y fibroblastos en contacto con PEEK y se demostró que no afectaban negativamente a su crecimiento y proliferación. Por último, se probaron en seres humanos piezas de cadera de CFR PEEK (10% fibras), que resultaron promover la proliferación y buen funcionamiento de los osteoblastos a los 5 días, igual que en las que ya se utilizaban de aleación de titanio. Los resultados de todas las investigaciones coinciden en que el PEEK no es tóxico a las células de los seres humanos.

Investigaciones estudiando la respuesta ante inflamaciones también han sido llevadas a cabo. Implantes de CFR PEEK en animales no han mostrado comportamientos anormales en los tejidos, ni infecciones visibles, con solo leves inflamaciones. Estos estudios también demostraron la efectividad del material ayudando a la curación de fracturas sin rechazo del cuerpo al agente externo introducido.

Finalmente, los estudios anteriores realizados en animales y mediante cultivo han demostrado la biocompatibilidad del PEEK y sus materiales compuestos. El comportamiento inerte del PEEK en ambientes biológicos no es sorprendente debido a su estabilidad química. Aunque investigaciones sobre el comportamiento del PEEK puro, sin tratar, son un primer paso necesario, se requieren más investigaciones en humanos sobre la biocompatibilidad del PEEK fabricado para comercialización y su biodesgaste.

El comportamiento inerte del PEEK también tiene un inconveniente, la posibilidad de que no interaccione con el medio y no estimule el crecimiento celular de hueso en la zona de implante en aplicaciones ortopédicas. Para solucionarlo, se estudió ser combinado con algún tipo de agente bioactivo que promueva, como su propio nombre indica, la bioactividad en torno a implantes de este material. Así pues, se crearon materiales compuestos combinando PEEK450G con fosfatos cálcicos como el fosfato beta-tricálcico (β -TCP) y hidroxiapatita (HA).

Ambos agentes bioactivos no afectaban a la cristalinidad ni al proceso de fabricación del PEEK. Al analizar los resultados, se comprobó que el polímero, combinado con el β -TCP hasta un 40%, inhibía la proliferación de células y se comportaba como el PEEK puro. Sin embargo, combinado con el HA, formando el PEEK-HA, en un 40% se observaba una gran proliferación de crecimiento celular. En contra, un porcentaje tal de HA provoca una importante reducción en las propiedades mecánicas del PEEK, disminuyendo el límite elástico en un 45%. Este punto débil reside en la interfase entre el PEEK y el HA, por lo que se necesitan más investigaciones en mejorar la adhesión de las partículas de HA en el PEEK y determinar qué concentraciones de HA son las adecuadas para cada aplicación ortopédica específica.

A finales de los años 80, los médicos ortopédicos se percataron del gran avance en la industria aeroespacial de los termoplásticos de alto rendimiento en sustitución de piezas metálicas y comenzaron a investigarlos como posibles materiales utilizados en implantes traumatológicos. Las primeras aplicaciones se centraron en el campo de los implantes vertebrales y desde entonces, el PEEK ha ido creciendo en número de aplicaciones e importancia en el sector biomédico. Las principales aplicaciones clínicas son las siguientes:

- Implantes traumatológicos:

Los primeros casos documentados de implantes en seres humanos datan de finales del s.XIX. En aquel momento y a partir de entonces, se utilizaron placas metálicas para sujetar huesos rotos por traumatismos y ayudar al crecimiento y regeneración del mismo, sirviendo de elemento resistente que soporta los esfuerzos mecánicos.

Ya en el s. XX, se descubrió que el principal problema de los implantes metálicos es la corrosión de los mismos, por lo que en la década de los 80 se empezaron a utilizar materiales compuestos de matriz polimérica termoestable reforzados con fibra de carbono. El problema de las matrices termoestables, como el epoxi, es la inhabilidad de los mismos de poder ser contorneado con la forma de la fractura del hueso, resultando menos eficientes clínicamente que las metálicas. Fue entonces, en la década de los 90, cuando surgieron los polímeros termoplásticos como matriz, como el PBT, PS y PEEK.

Las investigaciones se centraron en estos materiales ya que presentan un muy buen comportamiento mecánico y la ventaja de ser termocomformados in situ en quirófano para adaptarlos con más precisión a las necesidades anatómicas del hueso fracturado del paciente.

Los estudios sobre la capacidad del PEEK de ser utilizado como fijaciones semirrígidas en traumatismos y en artroscopias, favoreciendo la curación y la protección mecánica, continúan desarrollándose. A pesar de que las fijaciones de fracturas del PEEK poseen un número considerable de beneficios en la curación, queda todavía por demostrar si ofrece mejores resultados clínicos y funcionales a largo plazo que las metálicas. Sin embargo, rápidamente ha conseguido éxito en campos como la artroscopia y craneoplastias.

Se espera que el rendimiento del PEEK como implante aumente progresivamente en los próximos años a medida que se mejoran las técnicas de y optimizan las metodologías de diseño.

- **Implantes vertebrales:**

La familia PEEK de polímeros empezó a utilizarse como material de implantes en jaulas vertebrales en la década de los 90. La función de las jaulas es mantener la estabilidad de la parte anterior de la columna tanto en la zona lumbar como cervical. Debido a la carga mecánica que tienen que soportar estos implantes, inicialmente los cirujanos optaron por hacerlas de titanio, pero se encontraron con el problema de la inhibición de crecimiento celular y su opacidad ante técnicas de imagen. Con la aparición del PEEK, se eliminaron esos problemas y se creó una exitosa jaula denominada conocida como la jaula de Brantigan, que admitía refuerzos de fibra de carbono continua y discontinua.

Recientes estudios sobre las jaulas de PEEK concluyen que se acelera la fusión del material con las células del cuerpo si se combina con HA. Las potenciales limitaciones y problemas presentes en las jaulas de PEEK, como la subsidencia (hundimiento de vértebras), son comunes también a las hechas de metal. No obstante, debido a la demanda de carga de la columna vertebral, especialmente en la zona lumbar, y la dificultad en diseñar resistencias específicas para cada caso, es necesario tener en cuenta el potencial daño en la columna debido a fractura y sus posibles escombros. Las investigaciones llevadas a cabo mediante métodos de elementos finitos, concluyen que los implantes de PEEK son aparentemente inofensivos a la médula espinal.

En resumen, el PEEK lleva 15 años teniendo un exitoso historial clínico en aplicaciones de soporte de carga y unión vertebral. La radiolucencia del PEEK es otra ventaja sobre los metales, ya que permite ver el estado de tejidos adyacentes al implante muy delicados como la médula espinal. Por último, la versatilidad de este material permite a los implantes vertebrales ser diseñados y adaptados según una amplia variedad de rigideces, en función de las necesidades.

- Vástagos femorales:

Los implantes metálicos, cerámicos y poliméricos tradicionales utilizados en reemplazos totales de rodilla y cadera han sido considerados exitosos por la mayoría de cirujanos y pacientes, con una tasa de no rotura del 90% pasados 10 años en pacientes de la tercera edad.

Sin embargo, las necesidades clínicas de la comunidad ortopédica están orientadas en aumentar la longevidad de los implantes ya existentes en personas mayores y extender el éxito y posibilitar reemplazamientos totales de articulaciones en pacientes más jóvenes y activos.

De esta manera, toda nueva tecnología de implantes debe ser verificada su durabilidad a largo plazo, el PEEK no es menos y tiene que seguir siendo investigada su viabilidad como alternativa a los reemplazos de cadera metálicos. Los nuevos diseños de implantes de PEEK están todavía en estados prematuros de evaluación clínica.

El PEEK puro y CFR PEEK se han establecido hoy en día como un material suficientemente versátil y durable para implantes ortopédicos isoelásticos. El diseño de implantes isoelásticos ideales, concebido en los 60, está ahora empezando a demostrar ser una razonable opción en fijaciones y reductoras de carga comparadas con los vástagos metálicos tradicionales. De entre la variedad de polímeros que han sido evaluados para esta función en los últimos cuarenta años, solo el PEEK ha demostrado tener la combinación necesaria de resistencia mecánica, biocompatibilidad, facilidad de procesado y disponibilidad.

Los datos obtenidos en las pruebas clínicas a largo plazo son esperados impacientemente para saber si los implantes de PEEK continuarán ofreciendo amplios beneficios a los pacientes que se someten a artroplastias totales de cadera, como se ha estudiado hasta ahora.



Figura 4.1. 9 – De izquierda a derecha, ejemplos de implantes de PEEK vertebrales, en cabeza femoral y craneal.

- Superficies de apoyo en artroplastias:

Debido a sus excelentes propiedades termomecánicas, el PEEK y sus materiales compuestos han sido utilizados desde hace 30 años como elementos de rodamientos y cojinetes en aplicaciones industriales y aeroespaciales. Las investigaciones tribológicas del PEEK establecen que el comportamiento a fricción desgaste del material es muy bueno y depende del tipo y concentración de los refuerzos, de la rugosidad de las dos superficies en contacto, de la temperatura, de la velocidad de deslizamiento y la presión. Aunque hay muchos estudios sobre el comportamiento tribológico del PEEK, no existen tantos cuando se trata de reemplazamientos totales de articulaciones.

Solo en aplicaciones que ofrecen nuevos retos de diseño, como en los reemplazamientos de cabeza femoral y las articulaciones de dedos, donde el PEEK realmente puede aportar atractivas oportunidades y desarrollar su potencial. Aunque los diseños de cabezas femorales son esperanzadores y llevan varias fases de evaluación clínica, todavía serán necesarios más años para conocer su verdadera funcionalidad, quizás una década o más. Cuando los implantes médico se encuentran con casos con inusuales tamaños y restricciones dimensionales, tales que limitan sus opciones de diseño como superficies de apoyo, el PEEK debería considerarse como una alternativa factible a los materiales ortopédicos convencionales.

4.1.4.4. Otras aplicaciones.

Electrónica.

El conocimiento avanzado sobre materiales es crucial en el mercado de la electrónica que tan rápido avanza hoy en día. La tecnología continua poniendo al límite a las soluciones ingenieriles, especialmente en tecnología móvil, donde se buscan aparatos más delgados, ligeros e inteligentes. La demanda de alta integridad estructural, garantía y movilidad, así como respeto medioambiental, están determinando las maneras en las que los componentes electrónicos se diseñan y por lo que el PEEK es un material de uso. Sobre todo por sus ventajas medioambientales, ya que es reciclable y retrasa la propagación del fuego. El PEEK se utiliza en esta industria sobre todo en tecnología móvil como en interruptores, circuitos impresos, baterías y audífonos, y también en piezas de impresoras, fotocopadoras y sensores.

Dentro del sector de la electrónica, el PEEK es un material utilizado en semiconductores gracias a su bajo coste, alta productividad, capacidad de disipar cargas electrostáticas y resistencia a fuentes de contaminación. Algunas de las aplicaciones como semiconductor son: carcasas de pantallas LCD, FOUPs, portador y vara de obleas, etc.

Industrial.

Debido a la necesidad de aumentar la productividad, mejorando el comportamiento a largo plazo para reducir los tiempos y costes de mantenimiento, el PEEK está ganando gran aceptación como sustituto de metales en aplicaciones industriales. Este polímero presenta una combinación de propiedades único que lo hacen idóneo para este tipo de aplicaciones.

En la industria alimenticia, el PEEK mejora el rendimiento en una amplia gama de aplicaciones alimentarias y de bebidas, ofreciendo una más segura y duradera alternativa a los metales. Además, el PEEK es seguro ante el contacto repetido de alimentos y cumple los requisitos de la FDA y la UE en cuanto a toxicidad.

El PEEK también se utiliza en la industria textil, ya que es una industria que demanda materiales que sufren movimientos a altas velocidades, flexibles y duraderos.

Energía.

El PEEK es un material utilizado en el sector energético gracias a su gran capacidad para soportar altas temperaturas, altas presiones, vapor de agua y radiactividad sin alterar sus propiedades. Esto lo convierte en un material idóneo para estas aplicaciones que siempre, en mayor o menor medida, va a someter a los materiales a ese tipo de ambiente.

Es utilizado en la energía petrolífera y gaseosa como tuberías submarinas, sistemas de elevación marinos, tubos de perforación, juntas, clavijas, anillos, componentes eléctricos y electrónicos, rodamientos, engranajes, mangueras, etc.; en la energía hidráulica como rodamientos y engranajes; en la energía geotérmica; en la energía eólica en rodamientos, cojinetes, engranajes y placas ligeras de la estructura; en la energía nuclear como recubrimientos y aislantes; y en la energía solar como parte de las placas solares semiconductoras.

Protecciones.

También se ha desarrollado el PEEK en aplicaciones relacionadas con protecciones del cuerpo humano ante traumatismos, principalmente en cascos, tanto de uso militar como civil.

Desde hace casi 50 años se ha investigado sobre la posibilidad de realizar cascos de materiales poliméricos en sustitución de los metálicos, reduciendo peso y aumentando confort, manteniendo un comportamiento adecuado. Los ensayos realizados para determinar la funcionalidad de un casco son ensayos balísticos, en los que estudia el comportamiento del material frente a impacto y su absorción de energía. Es necesario que el material sea lo más elástico posible para absorber mejor la energía de un impacto y liberar al cráneo de cargas. Sin embargo, los polímeros termoplásticos no tienen un comportamiento muy elástico, con un límite elástico relativamente bajo, por lo que se combina con fibras de materiales más rígidos para aumentarlo. El principal componente de las fibras es el kevlar. De esta forma el PEEK es la matriz de un material compuesto reforzado con fibra kevlar. Todavía se sigue estudiando la verdadera funcionalidad del PEEK en este tipo de aplicaciones a impacto, donde la delaminación es el principal foco de fallo y de estudio y el proceso de fabricación tiene mucha influencia en el rendimiento final del material.

4.2. Comportamiento mecánico del Al 2024-T3 y aplicaciones.

Uno de los objetivos de los estudios e investigaciones sobre el comportamiento mecánico del PEEK es la posibilidad de ser un sustituto a estructuras ligeras metálicas obteniendo una mejora en costes y consumo de recursos y energía.

Además, la aleación 2024-T3 del aluminio es un material tradicional utilizado en la industria biomédica en aplicaciones protésicas, por lo que es conveniente conocer el comportamiento dinámico propio de las prótesis humanas en los nuevos materiales que puedan sustituirle, como el PEEK.

Por ello, se quiere enfocar el trabajo a la comparación del comportamiento dinámico del PEEK con respecto a Al 2024-T3 ya que es uno de los materiales estructurales ligeros más utilizados en las aplicaciones en las que el PEEK puede sustituirlo.

Así pues, a continuación se presentan las principales características, propiedades y aplicaciones del Aluminio 2024-T3.

4.2.1. Obtención.

El Aluminio (Al) es un elemento metálico no ferromagnético. Es el elemento atómico número 13 de la tabla periódica y el tercer elemento más común en la corteza terrestre. Se extrae únicamente de la misma a través del mineral conocido como bauxita y mediante el proceso Bayer se transforma en alúmina (óxido de aluminio - Al_2O_3) y finalmente, mediante electrólisis, se convierte en aluminio metálico.

Se caracteriza por su baja densidad y alta resistencia mecánica, propiedades que pueden optimizarse con la agregación de otros elementos químicos formando aleaciones. Por lo tanto, hay tantas variedades de aleaciones de aluminio como combinaciones de elementos aleantes y tratamientos térmicos que se le realicen. También es característica su resistencia a la corrosión, su buena conducción de la electricidad y el calor, se mecaniza con facilidad y es barato, gracias a su gran abundancia en La Tierra y fácil procesado.

Dependiendo del aleante con el que se combina el aluminio, las propiedades se mejoran en un aspecto y pueden empeorar en otro. En este caso concreto el Al 2024 pertenece a la serie de aluminios 2000, que se caracterizan por tener al cobre (Cu) como principal agente aleante, lo que ofrece un aumento de la resistencia mecánica y densidad con respecto al Al puro. También mejora su comportamiento a fatiga.

De manera más específica, la composición del Al 2024 contiene entre un 4,2 y 4,5% de cobre, entre un 1,3 y 1,5% de magnesio, entre un 0,5 y 0,6% de manganeso y menos de un 0,5% de silicio, hierro, zinc, níquel, cromo, plomo y bismuto.

Elemento	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn, Ni, Cr, Pb, Bi
Proporción (%)	4.2	1.4	0.5	0.3	0.2	< 0.2

Tabla 4.2. 1 – Composición de la aleación Al 2024-T3 (May et al., 2011).

Por último, dentro del Al 2024, el tipo de tratamiento térmico de templado que ha sufrido el material determina de manera significativa las propiedades mecánicas finales de la aleación. Para nombrarlo, se añade una letra en función del tratamiento térmico llevado a cabo durante el procesado. La letra 'F' significa que no ha recibido tratamiento; la letra 'O' indica que ha sido recocido; la 'H' para endurecimiento por deformación; una 'W' para soluciones inestables y la letra 'T' en tratamientos térmicos estables, a veces con endurecimiento por deformación añadido.

Las letras H y T suelen ser seguidos por uno o más dígitos que indican el método particular utilizado en el tratamiento térmico. Así pues, para nuestro caso, Al 2024-T3, es un aluminio tratado térmicamente en solución, temple, acritud y madurado natural.

El Al 2024-T3 fue la primera aleación de Al-Cu-Mg que superó los 350 MPa de resistencia mecánica, sustituyendo al Al 2017-T4, utilizado en muchas aplicaciones estructurales.

4.2.2. Propiedades.

a) Térmicas.

Al ser un material metálico, presenta solo una temperatura característica que modifica el comportamiento mecánico del mismo.

Esta temperatura es la conocida temperatura de fusión, temperatura a partir de la cual el material cambia de estado sólido a líquido, con una consecuente repentina pérdida de toda propiedad mecánica y uso estructural. Para el Al 2024-T3, este fenómeno comienza a producirse a partir de $T_m = 500^\circ\text{C}$ aproximadamente y no se completaría hasta alrededor de 640°C .

Sin embargo, no es del todo cierto ya que, aún dentro de este rango, las propiedades mecánicas están directamente condicionadas por la temperatura. Tanto las aleaciones de aluminio en general, como nuestro caso específico de Al 2024-T3, son muy sensibles a las altas temperaturas, entre 200 y 250°C , que provoca que el material pierda su resistencia mecánica casi totalmente. En cambio, estas aleaciones tienen un excelente comportamiento mecánico a bajas temperaturas, ya que se produce un aumento en la resistencia mecánica cuando trabajan a temperaturas por debajo de cero.

Otro aspecto térmico importante del comportamiento de los metales es su dilatación por aumento de temperatura, que se rige por el coeficiente de dilatación térmica. Es conveniente tener en cuenta este fenómeno en aplicaciones mecánicas y estructurales ya que estas dilataciones no son para nada despreciables y pueden inducir tensiones en la estructura. Para el caso del Al 2024-T3, el coeficiente $\alpha = 22,9 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

b) Medioambientales.

Resistencia a la corrosión.

En términos generales, consideramos corrosión a todo aquel proceso químico, debido a la interacción entre el metal y el ambiente, que puede causar un deterioro de las propiedades del material. El aluminio puro tiene una gran resistencia a la corrosión gracias a la capa de óxido que mantiene en la superficie, que evita el proceso de corrosión en aquellas zonas de la superficie que presenten esta película, en las que no, se producirá la corrosión.

Como se ha explicado anteriormente, para mejorar algunas propiedades mecánicas, el aluminio se combina con otros materiales formando aleaciones. Esta combinación, seguido por tratamientos superficiales en la mayoría de los casos, favorece la formación de soluciones sólidas y/o precipitados de endurecimiento que se traducen en una microestructura heterogénea. Esta microestructura heterogénea está intencionadamente desarrollada para aumentar la resistencia mecánica.

Sin embargo, esta heterogeneidad puede interrumpir la capa de óxido protectora en la superficie del aluminio y hacerlo vulnerable a corrosión localizada. Esta corrosión localizada resultará en un deterioro y pérdida de propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio, como el Al 2024-T3, especialmente en aplicaciones sometidas a desgaste.

La corrosión de las aleaciones de aluminio se puede clasificar en corrosión uniforme, localizada o en combinación con otros procesos, como la corrosión por esfuerzos mecánicos. La corrosión uniforme de la aleación se da lugar en presencia de soluciones ácidas o alcalinas con altas concentraciones de cloruro. La corrosión localizada puede a su vez ser dividida en picaduras, intergranular, por rendija, galvánica, por exfoliación y microbiológica.

La corrosión localizada por picaduras e intergranular son los mayores problemas corrosivos de las aleaciones de aluminio, como en la de estudio Al 2024-T3. Mientras que la corrosión intergranular ocurre en los bordes de grano, la picadura mayoritariamente sucede en los constituyentes de la superficie formando pequeños agujeros.

En resumen, el Al 2024-T3, al ser aleación, es muy susceptible a ser atacado por corrosión localizada debido a que la combinación con el aleante provoca una discontinuidad en la capa protectora de óxido.

Muchos estudios se han realizado y se realizan para mejorar la resistencia a la corrosión de esta aleación para que no pierda su alta resistencia mecánica.

c) Mecánicas.

Como se ha explicado anteriormente, el aluminio se puede combinar con otros materiales para modificar sus propiedades mecánicas. En este caso, el del Al 2024-T3, el aluminio se combina con cobre. Esta combinación da lugar a una aleación un aumento considerable de la resistencia mecánica con respecto a aluminio puro, convirtiéndose en la aleación de aluminio escogida para aplicaciones con altos niveles de exigencia mecánica.

Otro aspecto importante que caracteriza a las aleaciones es el tratamiento térmico que ha llevado durante su formación. La variación entre las propiedades de las aleaciones en función del tratamiento térmico, es considerable aunque todos provengan de la misma combinación de elementos. Así, pues, el Al 2024-T3, como indican los dos últimos dígitos, ha sufrido un proceso de solución, temple, acritud y madurado natural. Es una de las posibilidades que más aumento de la resistencia mecánica provee.

En términos generales, puede decirse que el Al 2024-T3 es un metal ligero, con alta resistencia mecánica que lo hace ideal para aplicaciones en las que el peso juega un papel decisivo y se deben cumplir unos exigentes requisitos mecánicos.

Al ser utilizado en aplicaciones mecánicas, es conveniente conocer el comportamiento a fatiga y fractura del material, ya que es muy probable que tenga que soportar cargas cíclicas y es necesario tener en cuenta su modo de fallo.

Generalmente, el daño por fatiga no está acompañado de ninguna modificación aparente en la forma o el aspecto del material: Aunque el daño por fatiga es progresivo, este hecho provoca que la ruptura aparezca repentinamente, debido a la disminución de área transversal en algún punto del material que aumenta el valor de la tensión por encima de lo diseñado. Para poder entender el comportamiento de este tipo de fallo y poder predecir la durabilidad de las piezas metálicas ante cargas cíclicas, es necesario estudiar el comportamiento mecánico de la microestructura.

Así pues, la vida a fatiga de un material puede dividirse en diferentes fases: excitación cíclica, nucleación de grieta, crecimiento de grieta microscópicamente y crecimiento macroscópico de la grieta hasta la rotura final. Una predicción precisa sobre el fallo a fatiga es muy complicado debido a la gran cantidad de variables y procesos físicos que entran en juego como la amplitud de la tensión, la geometría, la rugosidad superficial, el tipo de material, las tensiones residuales, el tamaño y concentración de defectos internos y huecos, dirección de aplicación de la carga, el tamaño de grano, el ambiente, la temperatura, etc.

Aunque de manera general la fatiga ha sido ampliamente estudiada, no se tiene mucha información concreta sobre el comportamiento del Al 2024-T3 ante este tipo de fenómeno. El estudio es complicado ya que intervienen comportamientos no lineales y complejas interacciones mecánicas en la microestructura de la aleación.

Otro aspecto importante en el estudio de las propiedades mecánicas de aleaciones estructurales en industria aeronáutica, automovilística y naval, es su comportamiento frente a impacto. Muchas investigaciones se han llevado a cabo con el objetivo de estudiar el comportamiento a impacto de aleaciones de aluminio, titanio y magnesio. Estas investigaciones están generalmente enfocadas en dos aspectos: dar con un preciso modelo de comportamiento termo-viscoplástico del material y determinar los mecanismos de deformación involucrados en la absorción de energía durante la perforación. Se ha demostrado que el Al 2024-T3 absorbe gran cantidad de energía en impactos en ambientes a bajas temperaturas.

Por último destacar la alta maquinabilidad del material, es decir, su facilidad operacional y bajo coste para ser mecanizado, ofreciendo la posibilidad de fabricar piezas de tamaños y dimensiones deseadas y con alta precisión de tolerancias.

4.2.3. Materiales compuestos.

El aluminio es material susceptible de ser combinado con otro formando lo que comúnmente se denomina como material compuesto. Como se explicó para el PEEK, un material compuesto es todo aquel formado por dos o más materiales diferenciados cuyas propiedades en conjunto son mejores que las de sus componentes por separado. En el caso del Al 2024-T3 y prácticamente de cualquier otro aluminio, el tipo de material compuesto que se fabrica es tipo sándwich.

Formando parte de un material compuesto tipo sándwich, el aluminio puede tener las funciones tanto de piel como de núcleo, en función de las características finales que se necesiten y del otro material con el que se combine. Dada la gran variedad de aleaciones de aluminio, las posibilidades de los materiales compuestos de aluminio son muy amplias, permitiendo diseñar el material compuesto de muy diversas maneras para cubrir casi cualquier necesidad.

El Al 2024-T3 puede ejercer de piel en materiales sándwich cuyo núcleo es un polímero, por ejemplo el PEEK, o con otro metal más ligero. Sin embargo, la configuración más utilizada en materiales compuestos de aluminio son las denominadas placas de nido de abeja.

Como el propio nombre indica, en esta configuración el material del núcleo, la sección paralela al plano de la lámina en el núcleo es un entrelazado de hexágonos, imitando a las formaciones de las abejas en sus panales. La siguiente figura lo explica gráficamente.

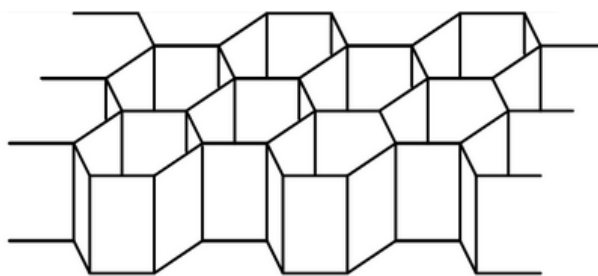


Figura 4.2. 1 – Representación gráfica de la estructura de tipo nido de abeja (honeycomb).

Esta disposición permite soportar excepcionalmente flexiones con placas muy ligeras y con espesores pequeños. El Al 2024-T3 dentro de los materiales tipo nido de abeja, puede tomar la función de piel y del nido. Generalmente, su uso será más frecuentemente como piel que como nido, ya que es una aleación con mayor peso y resistencia mecánica que el resto y son las características requeridas en las pieles, ya que el material del nido se caracteriza sobre todo por su ligereza. De esta forma, las aleaciones más utilizadas como nido son las de la serie 3xxx.

Las posibles aplicaciones de este tipo de material compuesto son extremadamente amplias. Inicialmente se utilizaron en la industria aeroespacial y rápidamente se expandieron a otros sectores donde la ligereza y la alta resistencia son los pilares. Algunas de las principales aplicaciones son las siguientes:

- Transportes: palas de las turbinas, mamparos y paneles del interior del fuselaje, puertas, suelos, parachoques, mamparos y paneles en paredes y techos en embarcaciones, mobiliario, etc.

- Construcción: paneles en muros cortina, fachadas, suelos, puertas.
- Maquinaria: máquinas herramienta, serigrafía, sistemas de ventilación y calefacción, absorción de golpes, deflectores de aire y fluidos, carcasas eléctricas.
- Ocio: en esquís y tablas de snowboard.

4.2.4. Aplicaciones.

4.2.4.1. *Sector aeroespacial.*

La industria aeroespacial requiere de soluciones que aporten ligereza y alta resistencia mecánica, debido a las características de las aeronaves, que sufren grandes tensiones y un aumento de peso se traduce en un aumento de costes y consumo de combustible y de emisiones de gases.

Por ello, el Al 2024-T3 es utilizado en este sector, debido a su ligereza y buen comportamiento mecánico bajo carga estática y cíclica.

Esta aleación se ha convertido en una de las aleaciones más populares para aplicaciones aeroespaciales. De manera general, la aleación se utiliza en la estructura del fuselaje y alas, costillas y aquellas otras piezas donde la rigidez, el comportamiento a fatiga y alta resistencia mecánica se requieren. Las chapas que cubren el fuselaje y las alas también se realizan de este material ya que puede soportar las altas temperaturas, de 120°C aproximadamente.

Las chapas metálicas de los compensadores, superficies de control, flaps y las puertas de acceso que no soportan carga, están fabricadas en muchos casos de Al 2024-T3, que pueden estar hechos de tipo sándwich.

Las piezas estructurales del tren de aterrizaje de aeronaves pesadas se realizan de aleaciones de aluminio forjadas.

La utilización del Al 2024-T3 en las llantas y piezas de las ruedas del tren de aterrizaje de aviones tanto comerciales como militares, permiten mantener los niveles de seguridad, durabilidad a largo plazo y ligereza que se requieren en esta aplicación.

En contraste con los aviones comerciales, las aeronaves de alto rendimiento sufren niveles 9 o 12 veces más altos de aceleraciones, con el consecuente aumento de la fuerza ejercida y las cargas soportadas. Sin embargo, el tiempo de vida de estos aviones es relativamente corto en términos de horas de vuelo, por lo que los problemas a fatiga no tienen relevancia. Desde 1945, este tipo de aeronaves han sido fabricados en aleaciones de aluminio de alta resistencia mecánica, impulsado por el servicio militar. La aleación 7075-T6 y la 2024 en todas sus variantes son los más utilizados.

También el Al 2024-T3 tiene aplicación en campo de los helicópteros, en piezas como en las palas del rotor.

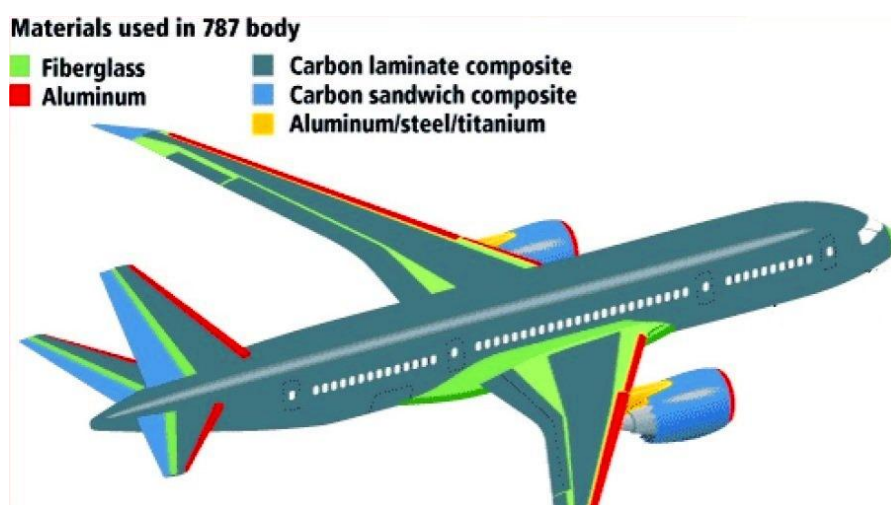


Figura 4.2. 2 – Partes de la estructura en una aeronave fabricadas en aluminio y materiales compuestos.

4.2.4.2. Sector automovilístico.

El sector automovilístico es una industria estrictamente conducida por sus intereses en reducción de consumo de combustible, de emisiones contaminantes y aumento del confort para el usuario. Para ello, es necesario reducir al máximo el peso del vehículo, manteniendo o incluso mejorando su comportamiento mecánico. Por ello el aluminio se presenta como el sustituto ideal al acero, reduciendo peso y emisiones.

Sustituyendo 1kg de acero por 0,5kg de aluminio, se consigue emitir 9kg de CO₂ menos a la atmósfera. De manera genera, utilizar aluminio en vez de acero en vehículos, evitaría la emisión de 44 millones de toneladas de CO₂ y se ahorrarían 108 millones de barriles de petróleo en combustible.

Además, es un material muy reciclable, lo que favorece la reducción de costes y de combustible en su fabricación. Casi el 75% del aluminio producido desde 1888 está siendo utilizado hoy en día, el 60% del aluminio utilizado en automóviles proviene de aluminio reciclado y cerca del 90% del aluminio de los vehículos es recuperado y reciclado al final de la vida del vehículo.

No solo ahorra combustible y emisiones contaminantes, sino que un vehículo hecho de aluminio mejora la conducción, acelera más rápido y frena en menos distancia, da al conductor mayor control sobre el vehículo, es más manejable y más estable.

Algunos ejemplos de las piezas que ya se sustituyen en vehículos por aluminio son los siguientes:

- Carrocería: láminas y chapas de aluminio se utilizan en capós, maletero, techo, puertas y suelo. Se ahorra hasta un 50% en peso, se reduce la fuerza de posibles impactos sobre peatones, reduce el coste de fabricación y de mantenimiento.
- Ruedas: el aluminio responde a la demanda de ligereza, resistencia y belleza en llantas y ruedas tanto en vehículos comerciales, camiones, turismos y motocicletas. La aleación más utilizada en este caso es la 6061.
- Sujeciones: el aluminio ofrece sujeciones de alta calidad, garantía y rendimiento. Se emplea en tuercas, tornillos, pestillos y anclajes de alta resistencia, cerraduras y sujeciones estructurales. Las sujeciones de aluminio pueden conseguir ahorrar una gran cantidad de peso y su gran comportamiento mecánico y vibratorio, permite incluso utilizar menos cantidad.

El uso del aluminio en vehículos ha dejado de ser una opción únicamente para coches lujosos y cada vez se ha introducido en el mercado. Algunos casos de confianza en el uso de aluminio son:

- Ford F-150: para el nuevo modelo del año 2015, han decidido hacer todo el cuerpo del vehículo en aluminio. Es un gran avance ya que este modelo es un icono de las pick-up y el más vendido, sobre todo en Estados Unidos.
- Tesla Model S: ha conseguido aligerar el peso del vehículo en un 33% con respecto al fabricado en acero.
- Ferrari: la marca ha utilizado el aluminio en sus modelos desde la década de los 40 en el bloque motor y carrocería. Hoy en día, es uno de las muchas marcas deportivas que utilizan aluminio en el chasis y carrocería.
- Audi A8: la marca ya comenzó a diseñar carrocerías de aluminio en la década de los 80.

4.2.4.3. Otras aplicaciones.

Edificación.

El aluminio ofrece la ventaja de poder diseñar elementos constructivos en múltiples formas, apariencias y es sostenible, aspecto que hoy en día es crucial. La nueva corriente arquitectónica, denominada bioconstrucción (green building) demanda soluciones que permitan una mejora de la eficiencia en el consumo energético y reduzca las emisiones de carbono.

Por lo general, la introducción de elementos hechos de aluminio favorece el aprovechamiento de la luz solar y la ventilación natural, lo que provoca una reducción en el consumo energético de los edificios. Además, es un material totalmente reciclable, el 95% del aluminio de los edificios es reciclado sin perder características.

Las piezas arquitectónicas hechas de aluminio no soportan la carga estructural de los edificios, solo soportan su propio peso o el peso de otros materiales, sin implicación estructural propiamente dicha, que se reserva al acero y el hormigón. Las aplicaciones son en ventanas, fachadas, muros cortina, escaparates y revestimientos.

Energía.

En este sector, el aluminio se presenta como una opción real de uso en sistema de perforación explotación petrolífera y de gas. Usado en tuberías para transportar fluidos o gases, tanto en tierra como offshore a grandes profundidades.

Una de las aplicaciones más demandadas para el aluminio es como tubo de perforación, generalmente en plantas petrolíferas. Con respecto a las fabricadas en acero, el aluminio reduce en un 50% el peso de la columna de perforación, aumenta la capacidad de extracción, crea un 20-30% menos de par torsor y estiramiento del tubo, mejor rendimiento en posiciones horizontales, reduce los tiempos y costes operativos y de mantenimiento, aumenta la profundidad admisible en más de un 50% y gracias a su ligereza, es más manejable y menos costosos de desplazar y maniobrar, haciéndolo más seguro.

Relacionado con las tuberías, el aluminio es el material elegido para fabricar los transportadores de las mismas durante su recorrido. Resultan ser un 50% más ligeras y más resistente a las profundidades, pudiendo doblar las hechas de acero.

Industrial.

En la maquinaria de plantas industriales cada vez se confía más en la aplicación de piezas en aluminio debido a su alta resistencia, durabilidad, comportamiento a bajas y altas temperaturas, conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión.

Aluminio forjado y fundido incrementa la eficiencia en diseños de turbinas de alto rendimiento para grandes y pequeñas empresas de generación de energía. También se fabrican sujeciones de aluminio en aplicaciones industriales.

Electrónica.

Este sector se caracteriza por una alta competitividad y los productos necesitan ser cada vez más ligeros, más delgados y más duraderos en una diversa variedad de formas y apariencias. Características que encajan con las del aluminio.

Carcasas y partes del cuerpo de teléfonos móviles, ordenadores portátiles y de mesa, tablets, cámaras de fotos y vídeo y pantallas planas son los productos destinatarios de los diseños en aluminio.

La utilización del aluminio en estas aplicaciones ofrece una mejora en los tempos de vida, una reducción del número de piezas, del tiempo y costes de ensamblaje.

Además, posee la capacidad de ser totalmente reciclado, aspecto muy importante debido al elevado número de estos aparatos que se desechan en el Mundo cada día y generan gran cantidad de residuos que, en este caso, no se abandonarían.

4.3. Modelización numérica del comportamiento.

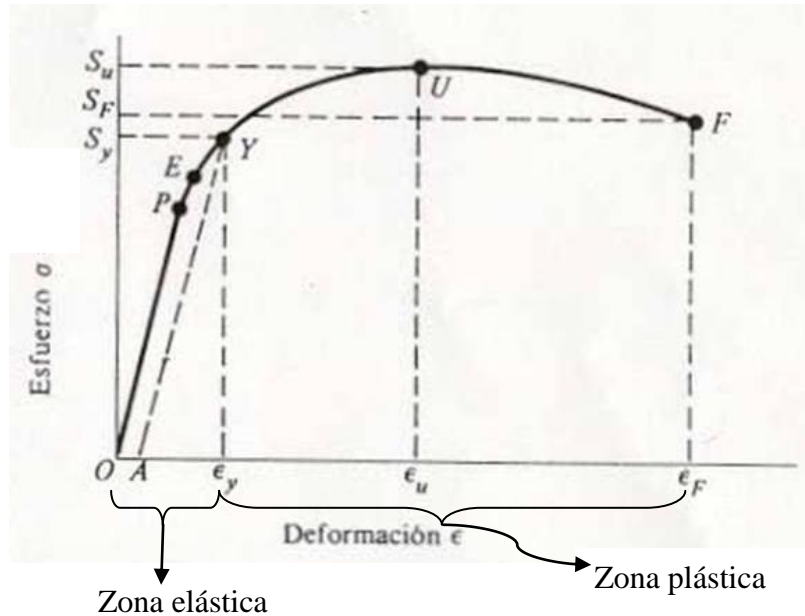
A continuación se describirán y explicarán brevemente los diferentes modelos de comportamiento que puede presentar un material ante la aplicación de carga sobre el mismo.

Generalmente, la primera división que se realiza para clasificarlos es según cómo es la deformación producida ante la aplicación de la carga. De esta forma el material puede comportarse elástico o plásticamente. En el primer caso, el material se deforma bajo el tiempo de aplicación de la carga y, cuando ésta desaparece, el material vuelve a su estado inicial sin deformar. Sin embargo, para el segundo caso, las deformaciones producidas bajo la aplicación de la carga son de carácter permanente e irreversible.

Todo material es a su vez elástico y plástico, aunque sí puede considerarse totalmente elástico o plástico cuando una de los de deformación es muy predominante con respecto al otro. El hecho que provoca el cambio de modo de comportamiento entre elástico y plástico no es más que una relación entre la carga aplicada, en términos de tensión interna del material en cuestión, y la deformación producida.

Por todo ello, la manera más sencilla y usada para representar el comportamiento mecánico de un material es mediante una gráfica, que relaciona los dos parámetros determinantes, conocida como curva tensión-deformación (σ - ϵ). Se trata de una curva característica, inherente y propia de cada material, que lo diferencia de los demás.

Dentro de cada material, existe una curva para cada valor de temperatura y velocidad de deformación producidos que puede ser muy distintas o parecidas entre sí, dependiendo de las propiedades del material.



Gráfica 4.3. 1 – Curva tensión-deformación típica de un material.

Antes de describir la relación entre tensión-deformación en cada uno de los casos, es necesario definir las variables.

Partiendo de un sólido deformable al que se le aplica una fuerza, esta fuerza genera un campo de desplazamiento local en el área de aplicación. A partir de este campo de desplazamientos, denominado como **u**, **v**, **w**, el desplazamiento en cada uno de los ejes X, Y, Z respectivamente, podemos definir el concepto de deformación.

La deformación de un material se subdivide en deformaciones longitudinales y angulares y representan el grado de deformación del mismo con respecto a su estado inicial sin carga. Matemáticamente se expresa esta relación entre desplazamiento y deformación de la siguiente forma:

Deformaciones longitudinales:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} ; \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} ; \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad [3]$$

Deformaciones angulares:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} ; \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} ; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad [4]$$

De manera general, todas las deformaciones están presentes en un elemento diferencial sólido deformable y se representan como una sola variable en forma matricial, denominada tensor de deformaciones $[D]$, que tiene la siguiente disposición:

$$[D] = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \epsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xz}}{2} & \frac{\gamma_{yz}}{2} & \epsilon_z \end{bmatrix}$$

A su vez, estas deformaciones generan esfuerzos en la estructura interna del material, que conocemos como tensiones. Tienen unidad de presión, fuerza por unidad de superficie (Pa), y se representan también matricialmente a través del tensor de tensiones $[T]$:

$$[T] = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \epsilon_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \epsilon_z \end{bmatrix}$$

Siendo $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ las tensiones normales en dirección X, Y, Z respectivamente y $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ las tensiones tangenciales en los planos XY, XZ, YZ respectivamente.

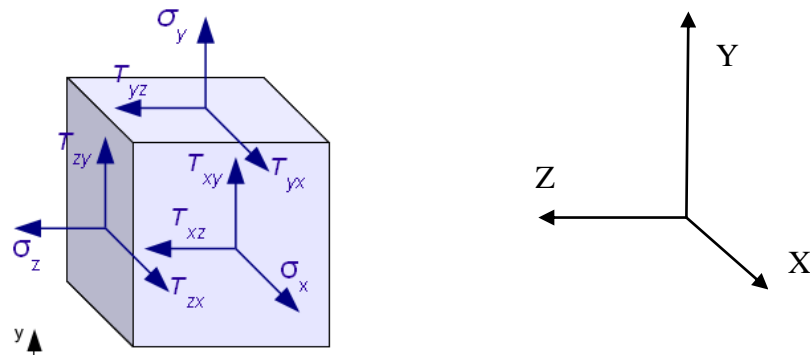


Figura 4.3. 1 – Tensiones normales y tangenciales en todas las direcciones de un sólido.

Habiendo definido las variables que rigen el comportamiento mecánico de los materiales, procedemos a definir las ecuaciones que regulan las relaciones entre las mismas. Primeramente se definen las ecuaciones de compatibilidad, que establecen la relación que tienen las deformaciones longitudinales y angulares de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \quad ; \quad 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} \quad ; \quad 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x \partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z} \quad ; \quad 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right)\end{aligned} \quad [5]$$

Además, las tensiones que se producen en un sólido rígido tienen que cumplir la condición de equilibrio es decir, que los sumatorios de fuerzas en todas las direcciones deben ser nulos. Este concepto se expresa mediante las ecuaciones de equilibrio:

$$\begin{aligned}\Sigma F_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \Sigma F_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \Sigma F_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0\end{aligned} \quad [6]$$

Una vez definidas las condiciones que deben cumplir todos los campos de deformaciones y tensiones, se puede proceder a describir el problema elástico o la relación entre tensión y deformación característica del régimen elástico de los materiales. Las ecuaciones que relacionan la deformación y tensión de un estado de sollicitación mecánica se denominan ecuaciones constitutivas. Las constantes de las ecuaciones constitutivas dependen de las propiedades del material mientras que la expresión y cálculo de las ecuaciones constitutivas son diferentes para el régimen elástico y el plástico.

La región elástica de la curva tensión-deformación de los materiales se caracteriza por una relación lineal de proporcionalidad entre ambas variables. Esta relación lineal fue descubierta por Robert Hooke en el s. XVII y es por ello que a esta relación se la denomina Ley de Hooke. Esta Ley establece que la tensión que sufre un sólido es proporcional a la deformación del mismo, regido por una constante de proporcionalidad característica de cada material y denominada Módulo de Elasticidad o Módulo de Young. Así pues, la ecuación constitutiva del régimen elástico es:

$$[T] = E[D] \quad [7]$$

Donde:

- $[T]$ es el tensor de tensiones, generalmente en MPa.
- $[D]$ es el tensor de deformaciones adimensional.
- E es el módulo de Young del material, generalmente en GPa.

De manera más generalizada, la Ley de Hooke se puede expresar de la siguiente forma, teniendo en cuenta las tensiones producidas en otras direcciones, mediante el coeficiente de Poisson:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_y + \sigma_z) \\ \epsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_z) \\ \epsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) \end{aligned} \quad [8]$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad ; \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \quad ; \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$

Donde:

- G es el módulo de elasticidad a cortadura del material, generalmente en GPa.

Como se ha dicho anteriormente, existen ecuaciones constitutivas diferentes para el régimen elástico que para el régimen plástico. La Ley de Hooke generalizada descrita es única para todos los materiales en régimen elástico.

Sin embargo, el régimen plástico genera muchas dificultades y no existe una única forma de abordar la ecuación constitutiva del material. Existen teorías clásicas como la Teoría Incremental de la Plasticidad o la Teoría de la Plasticidad en Deformaciones Totales.

Antes de modelizar y estudiar un material en su región plástica, se debe definir un criterio de cambio de estado elástico a plástico o criterio de plastificación, en el que se establecen las condiciones para que comience el proceso de deformación plástica.

En el caso de tensión uniaxial, el concepto de criterio de plastificación se ha reducido a que el valor de la tensión en esa dirección no supere un valor determinado, denominado límite elástico. Para hacerlo más general, se introduce el concepto de función de plastificación, cuyas variables son las componentes del tensor de tensiones y determina que nos adentramos en la región plástica si la función es mayor que cero. Así pues, para el caso de tracción uniaxial queda:

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}) = \sigma - \sigma_y = 0$$

Para determinar este mismo criterio en cualquier tipo de ensayo más allá del uniaxial, la plastificación se supone independiente del tiempo y la temperatura, conceptos que se introducirán en los modelos viscoplásticos. Además se añaden una serie de hipótesis de cálculo:

- El material es isótropo: es decir, las propiedades mecánicas no dependen de la dirección en la que se midan. De este modo, la función de plastificación dependerá de valores fijos para cualquier sistema de referencia, las tensiones principales o los invariantes:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \quad \text{o bien} \quad f(I_1, I_2, I_3) = 0$$

- La plastificación es independiente de la componente hidrostática de la tensión: por lo tanto, la función de plastificación debe poder expresarse en términos de la componente desviadora:

$$f(\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3) = 0 \quad \text{o bien} \quad f(J_2, J_3) = 0$$

Donde σ'_i y J_i son las tensiones principales e invariantes respectivamente del tensor desviador:

$$[T]' = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_h & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_h & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_h \end{bmatrix} ; \quad \sigma_h = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$$

Nótese que, para el tensor desviador, el primer invariante es nulo:

$$J_1 = \sum \sigma'_i = 0$$

- El comportamiento a tracción es igual que a compresión: no se tiene en cuenta el efecto Bauschinger, la función de plastificación no debe cambiar si todas las componentes del tensor de tensiones cambian de signo, es decir, es una función par.

Además, para metales, se ha demostrado la poca influencia del tercer invariante desviador sobre la plastificación, por lo que se elimina de la función, quedando ésta solo dependiente del J_2 que es una función par por definición. Así pues, la función de plastificación queda de la siguiente forma:

$$f(J_2) = 0 \quad [9]$$

Donde:

$$J_2 = -(\sigma'_1\sigma'_2 + \sigma'_2\sigma'_3 + \sigma'_1\sigma'_3) \rightarrow \text{en tensiones ppales. del tensor desviador}$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]$$

\rightarrow en tensiones ppales. del tensor de tensiones totales

Una vez definida la función de plastificación, se puede representar gráficamente lo que esto significa. Tomando el plano π que forman las tensiones principales del tensor de tensiones, podemos representar en el mismo cualquier estado tensional con origen en el origen de las tensiones principales. A su vez, este estado tensional se puede descomponer en su parte hidrostática (componente perpendicular al plano) y desviadora (componente proyectada en el plano).

En la segunda hipótesis de cálculo establece que la plastificación no depende de la componente hidrostática, es decir, de la proyección vertical, por lo que la plastificación dependerá de la longitud de la proyección desviadora. De este modo, podemos definir en el plano π una superficie de plastificación que será la superficie cilíndrica de radio igual al valor de la componente desviadora que cumple la función de plastificación.

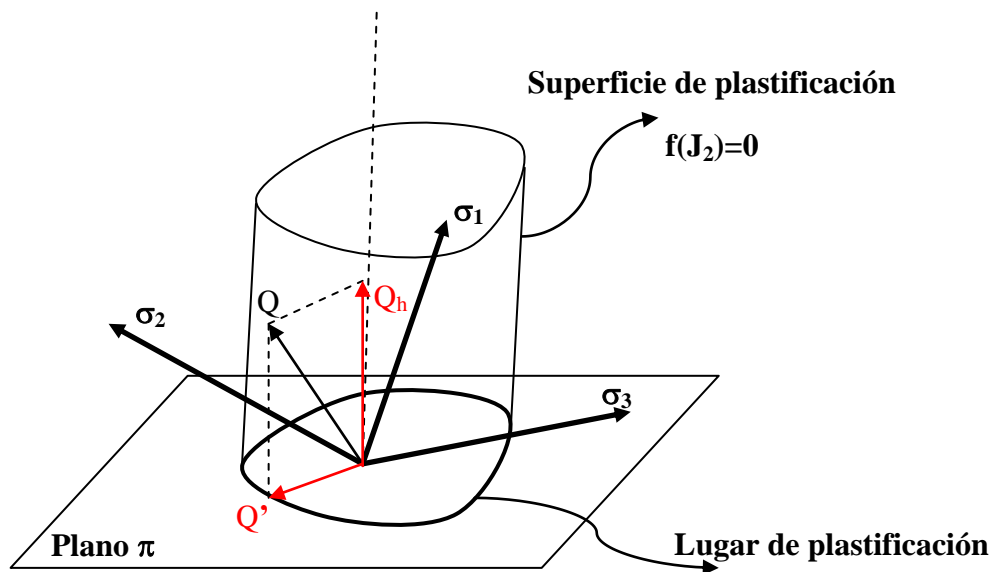


Figura 4.3. 2 – Representación gráfica en el espacio de la superficie y lugar de plastificación.

Por último, el concepto de lugar de plastificación representa el corte de la superficie de plastificación con el plano π .

En cuanto a las distintas interpretaciones del criterio de plastificación, ha habido muchas a lo largo de los años, las teorías clásicas más utilizadas son:

- Criterio de plastificación de **Tresca – Guest**:

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} - \tau_{crítica} = 0 \quad [10]$$

La superficie de plastificación es un prisma hexagonal y por tanto, el lugar de plastificación es un hexágono.

- Criterio de plastificación de **Von Mises – Hencky – Nadai**:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} - \sigma_y = 0 \quad [11]$$

La superficie de plastificación es un cilindro y el lugar de plastificación una circunferencia.

Ambos criterios son iguales en los puntos de tensiones principales tanto a tracción como a compresión ya que el lugar de plastificación del criterio de Von Mises es la circunferencia circunscrita al hexágono de Tresca. Por ello, el criterio de Tresca es algo más restrictivo.

4.3.1. Modelo termo-viscoplástico de Johnson-Cook.

Cuando a los fenómenos de plastificación se le une el efecto de la velocidad de deformación y la temperatura, el material de estudio se considera que es termo-viscoplástico, por lo que las ecuaciones constitutivas plásticas anteriores no son suficientes. Existen numerosos modelos de ecuaciones constitutivas que tienen validez para determinados estados, condiciones y materiales.

De entre los modelos viscoplásticos que implementa el software de Abaqus con el que posteriormente se realizarán las simulaciones, el único que tiene en cuenta simultáneamente la acumulación de daño, la sensibilidad a la velocidad de deformación y la temperatura del proceso es el modelo de Johnson-Cook. De esta forma, podemos modelizar el comportamiento de materiales con endurecimiento o ablandamiento térmico y con variación de respuesta mecánica ante diferentes velocidades de deformación.

Suele ser utilizado con gran precisión en metales como acero y aluminio aunque también es implementado en la modelización de algunos polímeros. En el caso de estudio, al ser un ensayo de impacto, se considera este modelo principalmente ya que en la zona de impacto se producen altos valores de temperatura y distintas velocidades de deformación en función de las velocidades de impacto, que determinan el comportamiento del material.

Así pues, la ecuación constitutiva presentada por este modelo relaciona la tensión sufrida en función de tres factores dependientes de cada uno de los factores que tiene en cuenta, deformación, velocidad de deformación y temperatura. De este modo, la tensión es acumulativa y cada fenómeno aporta su actividad.

$$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_p, \dot{\bar{\epsilon}}_p, T) = [A + B(\bar{\epsilon}_p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] [1 - T_H^m] \quad [12]$$

Donde:

- $\bar{\epsilon}_p$ es el valor de la deformación plástica en cada momento.
- $\dot{\bar{\epsilon}}_p$ es la velocidad de deformación.
- $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ es la velocidad de deformación del ensayo cuasiestático.
- T_H es una temperatura característica que se obtiene:

$$T_H = \begin{cases} 0 & \text{si } T < T_{room} \\ \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} & \text{si } T_{room} \leq T \leq T_{melt} \\ 1 & \text{si } T > T_{melt} \end{cases} \quad [13]$$

Donde:

- T es la temperatura del material.
- T_{melt} es la temperatura de fusión típica del material.
- T_{room} es la temperatura ambiente del ensayo.

Una vez definida la ecuación constitutiva general del modelo, solo es necesario calibrar las constantes A, B, C, n y m características de cada material a partir de resultados experimentales.

4.4. Ensayos de caracterización mecánica en polímeros.

Los ensayos de caracterización mecánica son aquellas pruebas experimentales que se realizan sobre un determinado material con el objetivo de conocer alguna característica mecánica concreta del mismo. Por ello, los distintos tipos de ensayos de caracterización determinan características distintas en cada ensayo. De manera general, el objetivo de los ensayos experimentales es reproducir las condiciones que se producen en algún estado común de carga. Estos estados comunes de carga pueden ser compresión tracción, cortadura, flexión, impacto, etc.

Una primera clasificación de los ensayos se divide en estáticos y dinámicos, atendiendo a si la carga que sufre el elemento de estudio varía rápidamente con el tiempo y se tiene en cuenta los efectos de la velocidad de deformación.

En cuanto a los ensayos estáticos, los más comunes son ensayos de compresión o tracción simple donde una barra del material de interés es sometido a cargas en la dirección longitudinal del mismo mediante distintos métodos y equipos.

Los ensayos dinámicos tienen como objetivo conocer el comportamiento de alguna propiedad del material bajo efectos de la velocidad de deformación. Estos ensayos pueden ser de impacto de proyectil de distintas geometrías ante placas de material de estudio o el mismo material de estudio siendo proyectado sobre un material rígido, este último denominado ensayo de Taylor.

Existe otro tipo de ensayos dinámicos, denominados ensayos de flexión, que se centran en el estudio de la capacidad flectora de un material. Algunos de ellos son de tipo impacto como el ensayo de Charpy o de Izod y otros se centran más en el comportamiento a flexión sin tener en cuenta fenómenos locales de impacto, como el ensayo de flexión en tres puntos.

Para el caso concreto del PEEK, existen varios estudios e investigaciones de caracterización del mismo en distintas configuraciones como ensayos de tracción y compresión simple (Rae et al., 2007), ensayo de Taylor (Millett et al., 2006) y ensayos de impacto en placas (García-González et al., 2014), sin embargo hay menos estudios sobre el comportamiento dinámico del mismo en ensayos de flexión en tres puntos. Además, este ensayo es típico para caracterizar estructuras ligeras ante esfuerzos dependientes de la velocidad de deformación (Sánchez-Sáez et al., 2007). Uno de los ensayos más similares al propuesto realizado sobre PEEK es el llevado a cabo en (Jaekel et al., 2011) donde somete a vigas de este material a cortadura mediante un ensayo denominado *small punch test*.

A continuación se exponen las características del ensayo de flexión en tres puntos.

4.4.1. Ensayo de flexión en tres puntos.

El ensayo de flexión en tres puntos consiste en provocar la flexión de un elemento tipo viga, comúnmente de sección transversal rectangular, apoyándolo en sus extremos y generando una fuerza puntual y vertical en su punto medio.

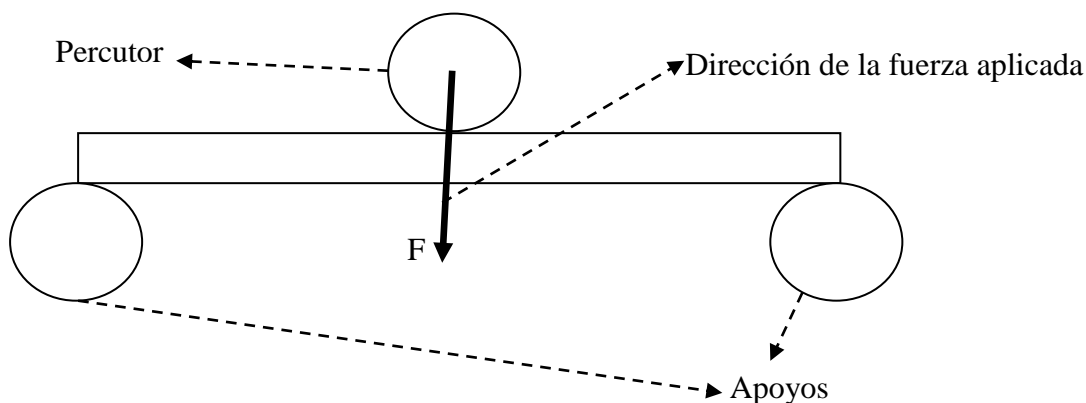


Figura 4.4. 1 – Esquema típico de configuración del ensayo de flexión en tres puntos.

Al someter al material a dicho esfuerzo, se produce una deformación del mismo que siempre tiene la siguiente apariencia:

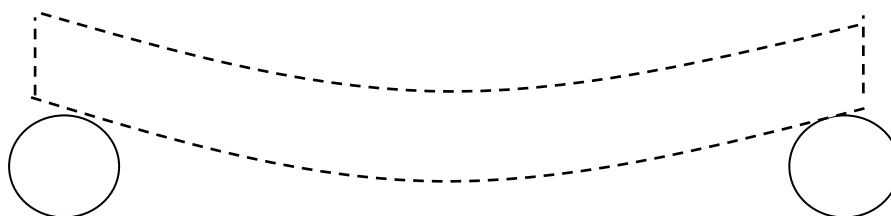


Figura 4.4. 2 – Deformación típica de viga sometida a ensayo de flexión en tres puntos.

De este modo, se inducen tensiones de tracción en la cara inferior de la viga y de compresión en la cara superior.

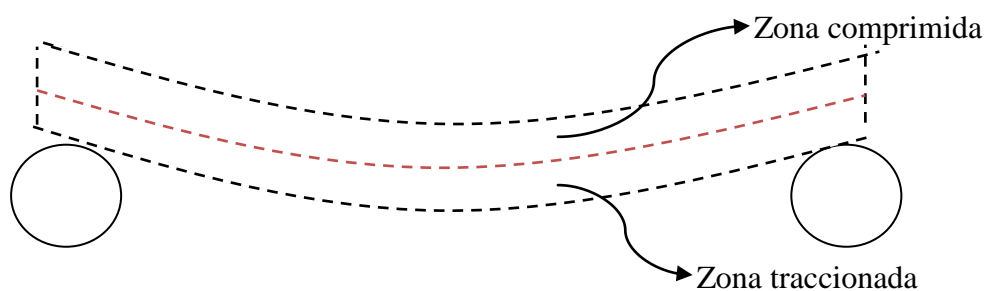


Figura 4.4. 3 – Mapa de tensiones normales en la probeta deformada en ensayo de flexión en tres puntos.

Los apoyos del ensayo de flexión en tres puntos solo restringen el movimiento en la dirección de la fuerza, actuando como un apoyo simple, que permite el giro. Existen diversos métodos de realizar este ensayo experimentalmente, que difieren entre sí en la forma de aplicación de la carga. Los más conocidos y utilizados son mediante un péndulo Charpy o mediante torre de caída. El primero consiste en dejar caer un péndulo desde una altura determinada hasta que impacte en la zona más baja, de manera que se puede conocer la energía de impacto y la energía absorbida en el proceso gracias a las alturas de comienzo y final del péndulo.

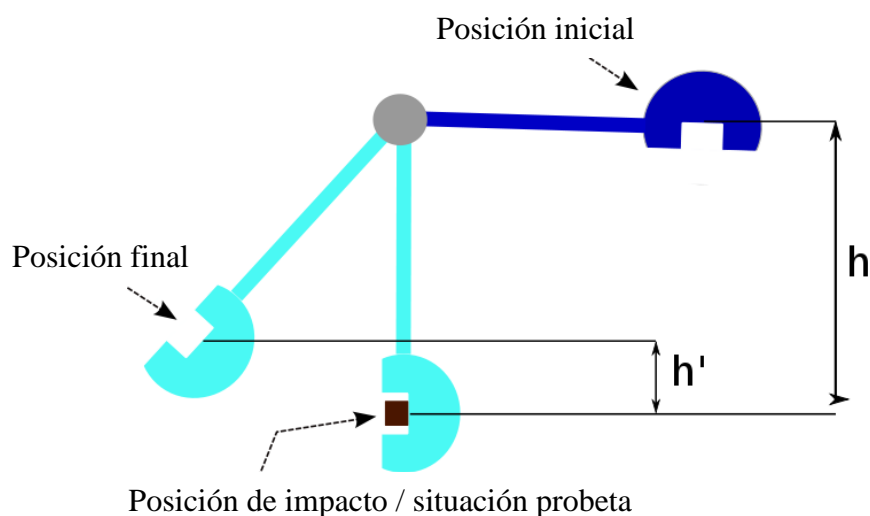


Figura 4.4. 4 – Representación del método de aplicación de la carga en el péndulo de Charpy.

Por otro lado, la torre de caída permite realizar este ensayo con impactos a la velocidad y masa del percutor deseada.

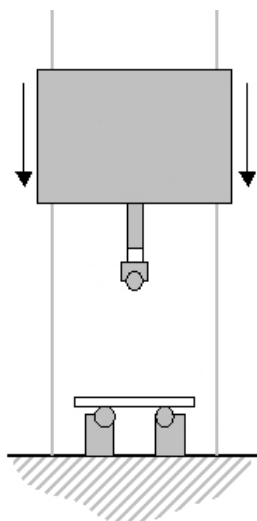


Figura 4.4. 5 – Representación del método de aplicación de la carga en torre de caída.

Por lo general, los ensayos de flexión en tres puntos en el péndulo Charpy suelen realizarse para llevar al material hasta la rotura del mismo, para realizar estudios de tenacidad a fractura. Por ello, con el objetivo de estudiar la rotura del material, se suele realizar una entalla a pequeña abertura en la zona traccionada de la viga para que se propague y lleve con mayor facilidad a la rotura de la probeta. Esta configuración también es común en ensayos en torre de caída.

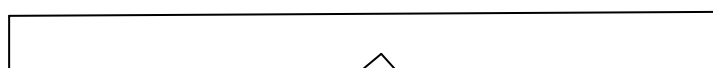


Figura 4.4. 6 – Detalle de entalla típica en probetas para ensayos de flexión en tres puntos.

Sin embargo, también se recurre a ensayos de flexión en tres puntos de probetas sin entalla para el estudio del comportamiento dinámico. Es un ensayo de interés general sobre todo en estudios sobre estructuras ligeras como materiales compuestos o polímeros, donde se estudia la absorción de energía del material antes de la rotura (Seong Sik Cheon et al., 1999).

Dentro de los ensayos de flexión en tres puntos, podemos hacer otra clasificación de los mismos atendiendo a la velocidad de deformación, o lo que es lo mismo, la velocidad con la que el percutor incide con el elemento. Así pues, quedan definidos de la siguiente forma:

Ensayos	$\dot{\epsilon}$	Observaciones
Ensayos estáticos	$\dot{\epsilon} < 10^{-1} \text{ s}^{-1}$	<ul style="list-style-type: none"> Se pueden emplear fórmulas de Resistencia de Materiales Se realizan, en general, en máquinas universales de ensayo
Ensayos a velocidades medias	$10^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^2 \text{ s}^{-1}$	<ul style="list-style-type: none"> En algunos casos es posible usar las fórmulas de resistencia de materiales La respuesta de la estructura es global Se realizan en equipos como el péndulo Charpy o la torre de caída de peso
Ensayos a altas velocidades	$10^2 < \dot{\epsilon} < 10^4 \text{ s}^{-1}$	<ul style="list-style-type: none"> Aparecen fenómenos de propagación de ondas Se emplean dispositivos como la barra Hopkinson, cañon de gas
Ensayos a muy altas velocidades	$\dot{\epsilon} > 10^4 \text{ s}^{-1}$	<ul style="list-style-type: none"> La respuesta es local Se emplean dispositivos pirotécnicos

Tabla 4.4. 1 – Clasificación de los ensayos de flexión en tres puntos según velocidad de deformación.

De este modo, las velocidades tomadas en este trabajo, de 6 y 8 m/s, se clasifica en ensayos a velocidad media. Los ensayos de flexión en tres puntos a velocidades medias, permiten el uso de las ecuaciones de la Resistencia de Materiales, lo que facilita el cálculo analítico de los mismos. Se puede afirmar también, que en este rango de velocidades, la respuesta de la viga es global, es decir, no se consideran fenómenos de impacto locales en la zona de contacto debido a altas velocidades.

5. Simulación numérica del comportamiento.

Para caracterizar el ensayo de flexión en tres puntos descrito, se pueden utilizar modelos analíticos o numéricos que nos den una información lo más cercana posible a la realidad sin la necesidad de realizar el ensayo experimental.

Un modelo numérico es aquel que permite resolver las ecuaciones de un modelo matemático, realizando algunas simplificaciones e iteraciones. En la mayoría de los casos, supone un gran avance ya que permite realizar numerosos cálculos en muy poco tiempo.

En el caso de problemas mecánicos, se utiliza el método de los elementos finitos como modelo numérico de resolución. En el caso de estudio, se ha utilizado el código comercial Abaqus/Explicit que permite obtener un resultado convergente con mayor facilidad en problemas dinámicos donde las variables cambian a gran velocidad y los intervalos de discretización del tiempo son pequeños, como en el caso de estudio.

5.1. Mallado y condiciones de contorno.

Incluye toda la descripción de las características del problema, en cuanto a geometría, colocación de las distintas partes en el espacio y entre ellas, comportamiento e interacción entre las mismas, definición de las condiciones de contorno y posibles cargas aplicadas, definición del tipo de procesado y mallado o división del problema en elementos.

El primer paso es crear las partes de las que consta el problema según su geometría. En el caso de estudio, se presentan dos partes, la viga y el percutor. Las dimensiones de la viga y el percutor se describen a continuación:

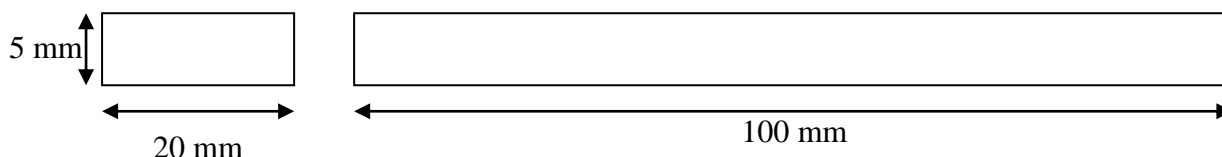


Figura 5.1. 1 – Dimensiones de la viga.

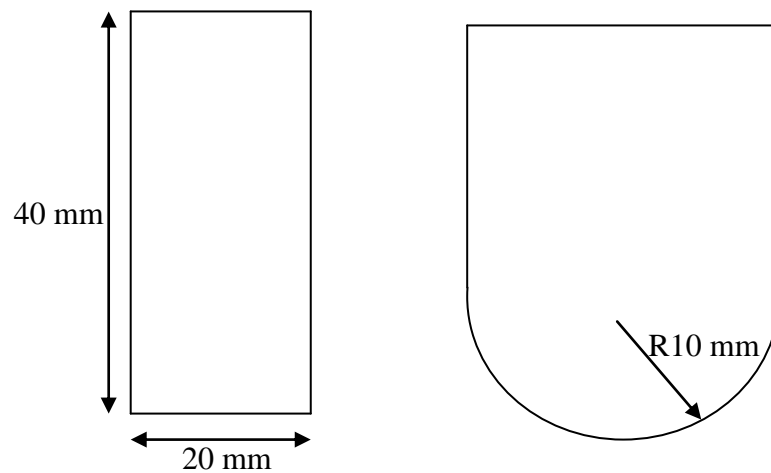


Figura 5.1. 2 – Dimensiones del percutor.

Ambas partes se definen como elementos sólidos 3D. Dada la configuración del problema, cabría la posibilidad de realizar un modelo en 2D que supondría un ahorro en tiempo de computación. Sin embargo, el cálculo en 3D en este caso no requiere demasiado tiempo, con lo que se ha modelizado así para tener más control sobre las variables.

Es imprescindible situar en el espacio correctamente las partes para que reproduzcan exactamente el problema. En este caso, el percutor debe ocupar todo el ancho de la viga y el punto de contacto debe estar en el punto medio de la longitud de la viga, como muestra la siguiente figura:

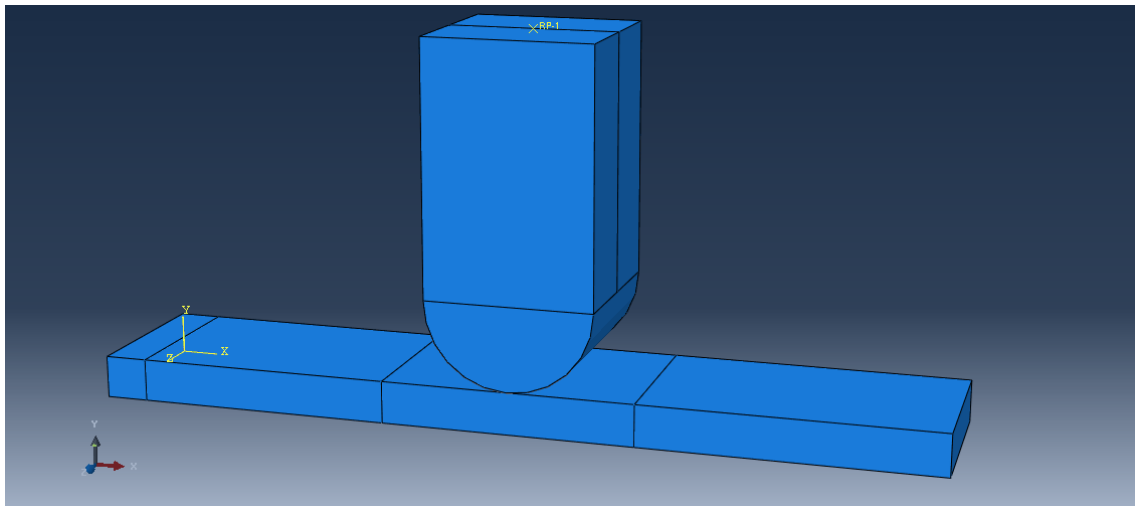


Figura 5.1. 3 – Imagen del conjunto viga-percutor en el modelo numérico (Abaqus).

Para simular el contacto que existiría en el ensayo de flexión en tres puntos, se impone un contacto *surface-to-surface* entre la superficie semicircular del percutor y la superficie de la viga que recibe el impacto. Además, este contacto se configurará como un *hard contact* sin coeficiente de rozamiento. Por último, se aplicará una restricción tipo *rigid body* al percutor que impide la deformación del mismo, como ocurre en el ensayo experimental.

Otro de los pasos importantes es aquel en el que se define el tipo de análisis que va a realizar Abaqus. Es conocido por el módulo *step* y en él se pueden definir tantos estados del problema como se desee.

Para el caso de estudio, se añade al ya creado por defecto estado inicial, un *step* de tipo *dynamic/explicit* de duración variable en función de la velocidad de impacto de cada simulación, aunque siempre lo menor posible, para ahorrar coste computacional, por lo que este tiempo siempre será del orden de milisegundos.

En esta fase se deben definir también las condiciones de contorno del problema. Para poder reproducir las condiciones del ensayo de flexión en tres puntos, los apoyos se han modelizado analíticamente como un apoyo simple que impide el movimiento vertical. Así pues, en el modelo numérico se impedirán los desplazamientos verticales en las aristas inferiores de los extremos de la viga. Para asegurar un estado de tensión y deformación plana, se impide el movimiento de la viga en el eje transversal a la viga. Además, para conseguir un impacto lo más perpendicular posible del percutor sobre la viga, solo se le permite al percutor los desplazamientos en el eje vertical.

El impacto del percutor sobre la viga se simula imponiendo una velocidad inicial al percutor. De este modo, queda impuesta la velocidad requerida justo en el momento del impacto.

Por ello, esta velocidad se define en el estado o *step* inicial, y propagada en el resto de estados o *steps*, dejando que el programa recalculé el problema una vez se produzca el contacto a esa velocidad. Del mismo modo se procede con la temperatura del elemento. En el estado inicial se define la temperatura deseada de la viga en el momento de impacto.

El último paso de este apartado es uno de los más importantes. Se trata del mallado del modelo, proceso por el cual el programa divide el problema en elementos sencillos para calcular las variables en los puntos de interés de cada uno e integrarlos a la totalidad del conjunto. Dependiendo del tipo de elemento que se defina el resultado puede variar, por lo que hay que ser cuidadoso en la selección del mismo. Por lo general, se debe mallar con elemento más pequeños, malla más fina, en aquellas zonas donde se prevean que se van a producir grandes gradientes en las variables de estudio, altas concentraciones de tensiones o cambios bruscos en la geometría.

El mallado del percutor tiene como objetivo principal ser lo más representativo del objeto modelizado, es decir, que reproduzca lo mejor posible la geometría para que el impacto sea como se ha ideado. Por ello, se realiza una partición de la punta semicircular del percutor para realizar un mallado más fino que en el resto del mismo para asegurar que el impacto se produce en un punto.

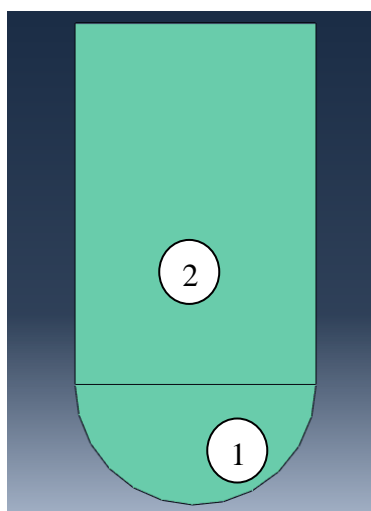


Figura 5.1. 4 – Detalle de la partición realizada al percutor en el modelo numérico.

Zona 1: zona de contacto; Zona 2: cuerpo.

En cuanto a la viga, en la zona del impacto se van a producir grandes variaciones en las variables en poco tiempo y además resulta ser la zona estudiada posteriormente. Por ello, es conveniente realizar un mallado más fino en esta zona para evitar picos en las variables y que el comportamiento se suavice lo máximo posible.

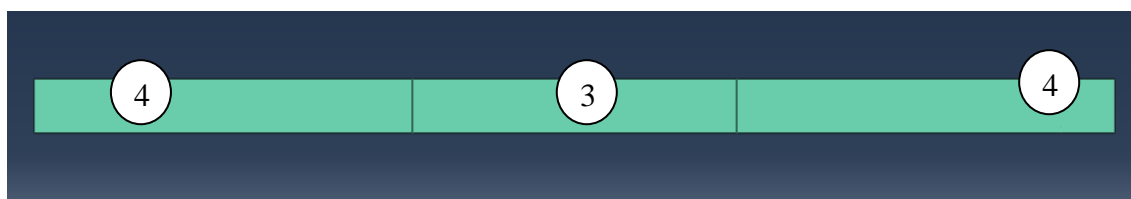


Figura 5.1. 5 – Detalle de la partición realizada a la viga en el modelo numérico.

Zona 3: parte central; Zona 4: extremos.

En el resto de zonas, no es necesario realizar una malla tan fina ya que la influencia en los resultados no es tan acusada, aunque debe garantizar un buen resultado. Además, de este modo se reduce el número total de nodos del problema y por tanto, el tiempo de cálculo.

Así pues, finalmente el mallado del percutor consiste en 820 elementos en la zona de contacto (zona 1) y 400 elementos en el cuerpo (zona 2) de tipo C3D8R y de la viga en 3000 elementos de tipo C3D8R en la parte central (zona 3) y 2800 elementos de tipo C3D8R en el exterior (zona 4), con un total de 9109 nodos en el conjunto.

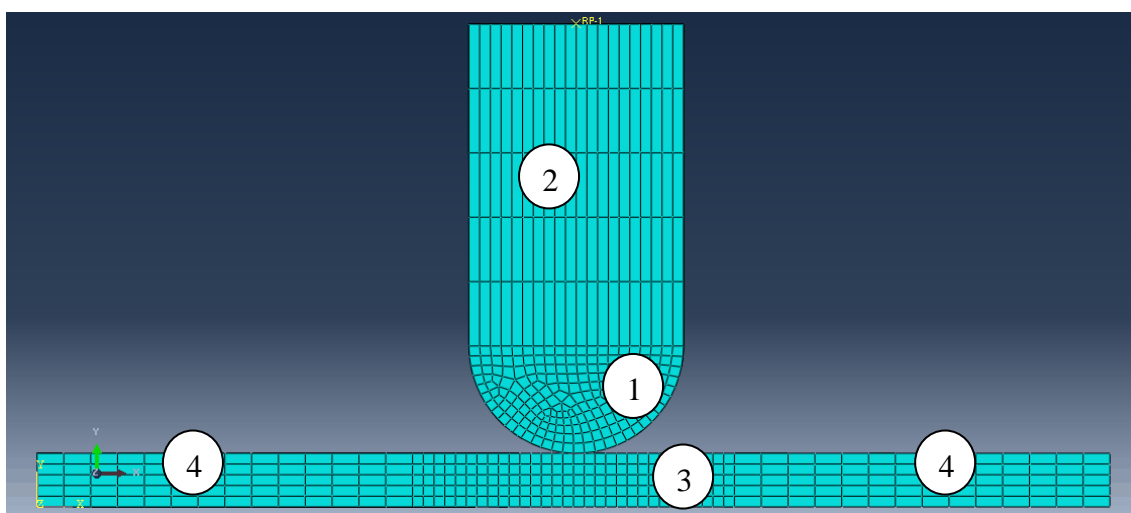


Figura 5.1. 6 – Detalle del mallado final del percutor y la viga.

5.2. Modelización del comportamiento termo-viscoplástico.

A continuación, se definen los materiales. Pueden ser definidos de múltiples maneras, atendiendo a su comportamiento elástico o plástico, o en función de datos experimentales que se tengan del mismo. Es un paso importante ya que las propiedades del material determinan directamente el comportamiento del sistema. En el caso de estudio, se definirán dos materiales, uno para el material de la viga y otro para el percutor.

Como ya se ha explicado anteriormente, el PEEK va a ser definido un modelo termo-viscoplástico de Johnson-Cook. Para poder definirlo de tal modo, es necesario conocer los parámetros de la ecuación constitutiva del modelo que exige el Abaqus. Estudios previos han determinado cuáles son estos parámetros característicos del PEEK para la ecuación de Johnson-Cook (García-González et al., 2014) y se muestran en la Tabla 5.2.1.

Pieza	Material	A [MPa]	B [MPa]	n	C	m	T _{melt} [K]	T _g [K]	$\dot{\epsilon}_0$
Viga	PEEK	120	20	0.36	0.04	0.88	616	416	0.015

Tabla 5.2. 1 – Parámetros ecuación Johnson-Cook para el PEEK (García-González et al., 2014).

Para asegurar que estos parámetros son correctos, se ha realizado una validación de los mismos, que se especifica más adelante en este apartado.

La definición del material no está completa únicamente con su comportamiento plástico, es necesario también introducir las constantes del régimen elástico del material, como son el módulo de Young y de Poisson. En este apartado, gracias a las investigaciones de otros autores (Rae et al., 2007), se introducirá un valor del módulo de Young dependiente de la temperatura, que se presenta tabulado a continuación:

Pieza	Material	ν	E [GPa]	T [K]
Viga	PEEK	0.4	4.25	223
			4.24	233.4
			4.21	246.5
			4.19	258.9
			4.15	273
			4.12	285.8
			4.07	301.5
			4.02	322.9
			3.96	339.3
			3.92	354.7
			3.88	373
			3.81	386
			3.73	401
			3.66	412
			3.39	416
			3.19	419
			2.99	423

Tabla 5.2. 2 – Variación de las constantes elástica del PEEK con la temperatura (Rae et al., 2007).

Finalmente, para que en la simulación se tengan en cuenta el efecto del incremento de temperatura descrito anteriormente, es necesario introducir los valores de densidad, calor específico y la fracción de calor producido por el trabajo plástico:

Pieza	Material	ρ [kg/m ³]	β	C_P [J/kg·K]
Viga	PEEK	1320	0.9	220

Tabla 5.2. 3 – Densidad, fracción de trabajo plástico y calor específico del PEEK (Rae et al., 2007).

En este punto se define también las propiedades del percutor. El estudio no tiene en cuenta el comportamiento del percutor por lo que es definido mediante un material lo suficientemente resistente para no sufrir deformación en el impacto y que ésta se aprecie solo en la viga. Por ese motivo, el percutor se ha diseñado de acero. Con el objetivo de reproducir unas condiciones típicas de un ensayo experimental, es necesario que en la simulación el percutor tenga un peso considerable al ejercido por toda la máquina. Como solo se modeliza la parte final del percutor, es necesario variar la densidad del material respecto del acero para conseguir la masa impactada deseada. Así pues, las propiedades elásticas del acero, densidad y masa del percutor son las siguientes:

Pieza	Material	E [GPa]	ν	ρ [kg/m ³]	M [kg]
Percutor	Acero	210	0.33	52631	1.2

Tabla 5.2. 4 – Propiedades elásticas, densidad y masa del percutor.

Para poder utilizar las constantes de la ecuación de Johnson-Cook en el modelo numérico como se ha explicado anteriormente, se realiza una validación de las mismas.

Esta validación consiste en realizar un cálculo de una curva tensión-deformación obtenida mediante los parámetros de Johnson-Cook anteriores y compararlos con su equivalente obtenida mediante datos experimentales realizados en otras investigaciones (Rae et al., 2007).

El método de cálculo de la curva tensión-deformación para las constantes de Johnson-Cook anteriores, consiste en un proceso iterativo en el que se obtienen los distintos puntos de la gráfica discretizando los valores de la deformación. Es decir, para cada valor de deformación, realizar el proceso iterativo para obtener el valor de la tensión. Como la ecuación de Johnson-Cook depende de tres variables: la deformación plástica, la velocidad de deformación y la temperatura, es necesario obtener cada uno de estos valores para cada valor de la deformación.

Se ha definido un incremento de deformación constante de 0,01. Con el objetivo de comparar esta curva analítica con la experimental, es necesario reproducir las condiciones de velocidad de deformación y temperatura de la curva seleccionada. En este caso, se quiere comparar con la curva experimental obtenida en un ensayo de compresión con velocidad de deformación de 100s^{-1} y a 23°C de temperatura.

Así, como la velocidad de deformación viene definida por la ecuación 14:

$$\dot{\bar{\epsilon}}_p = \frac{\bar{\epsilon}_{p,i} - \bar{\epsilon}_{p,i-1}}{t} \quad [14]$$

Donde:

- $\dot{\bar{\epsilon}}_p$ es la velocidad de deformación [s^{-1}].
- $\bar{\epsilon}_{p,i-1}$ y $\bar{\epsilon}_{p,i}$ son las deformaciones plásticas en un estado y en el siguiente, respectivamente.
- t es el tiempo que transcurre entre ambos estados [s].

Para poder reproducir estas condiciones en la curva analítica, es necesario discretizar el tiempo entre deformaciones en intervalos de $0,0001\text{s}$ para dar lugar a una velocidad de deformación de 100s^{-1} .

Por último, como la temperatura del ensayo experimental es de 23°C , la temperatura inicial en la curva analítica antes de la primera iteración será también 23°C .

Una vez definidas las condiciones iniciales, se procede a realizar las iteraciones. Esta iteración es resultado del modelo de Johnson-Cook que determina que, la tensión producida en un estado crea un aumento de temperatura en el material que a su vez afecta y hace aumentar la tensión. Este incremento de temperatura viene definido de la siguiente forma:

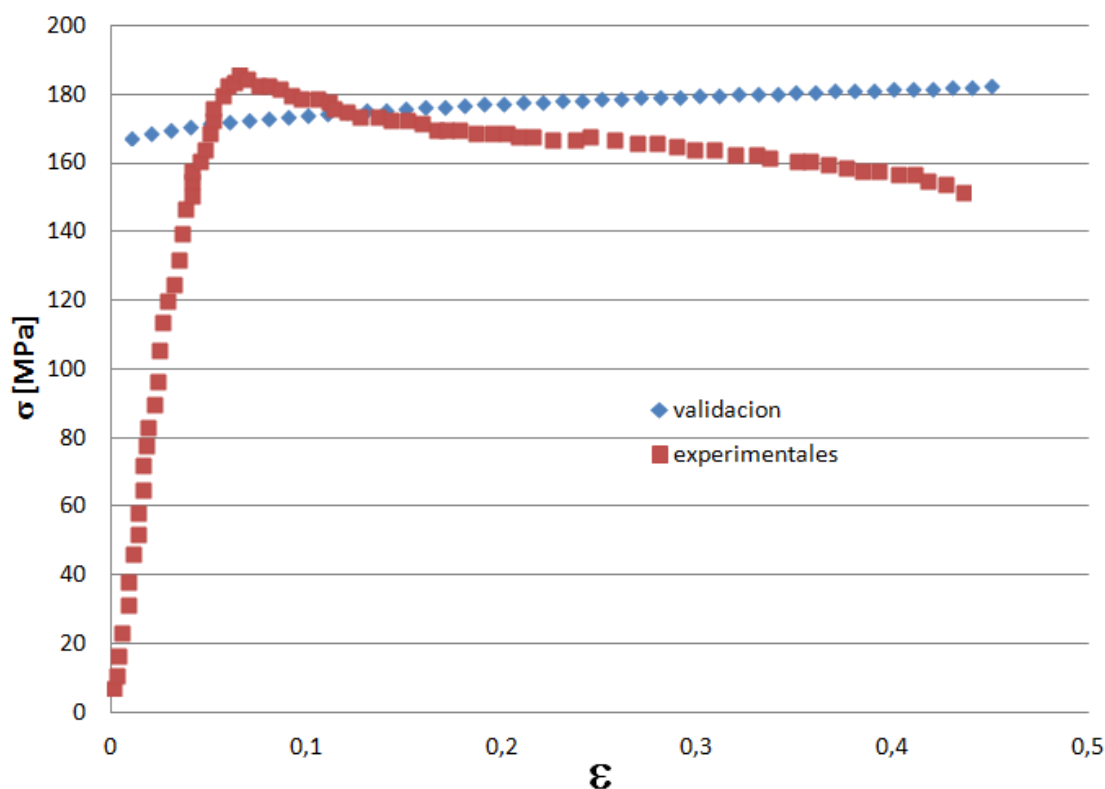
$$\Delta T(\bar{\epsilon}_p, \dot{\bar{\epsilon}}_p, T) = \frac{\beta}{\rho \cdot C_p} \int \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_p, \dot{\bar{\epsilon}}_p, T) d\bar{\epsilon}_p \quad [15]$$

Donde:

- β es el porcentaje de trabajo plástico convertido en calor.
- ρ es la densidad del material [kg/m^3].
- C_p es el calor específico del material [$\text{J/kg}\cdot\text{K}$].

Este incremento de temperatura modifica el término T_H de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook, provocando que la tensión cambie y sea la definitiva.

De este modo, realizando las iteraciones para cada valor de deformación plástica definido, se obtiene la siguiente gráfica comparada con la experimental:



Gráfica 5.2. 1 – Curva tensión-deformación experimental y con las constantes de Johnson-Cook del PEEK utilizadas para velocidad de deformación de 100 s^{-1} y 23°C .

Habiendo completado toda la definición del problema con el mallado, condiciones de contorno y propiedades de los materiales, el siguiente paso es dejar que el programa calcule y, posteriormente, analizar los resultados. Las distintas simulaciones y resultados de las mismas se detallan más adelante en el Capítulo 6.

5.2.1. Modificación término T_H .

Dentro de la definición de los materiales, es necesario introducir, en el apartado de comportamiento plástico de Johnson-Cook, la temperatura de fusión del material. Esta temperatura de fusión es utilizada en el modelo para determinar el término T_H del factor de la ecuación que incluye el efecto de la temperatura:

$$T_H = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad [13]$$

Sin embargo, para el PEEK con una T_{melt} de 343°C y una temperatura ambiente de 23°C, da lugar a un cociente con un denominador muy elevado en comparación al numerador. De esta forma, el término T_H es muy bajo y los efectos de la temperatura en el modelo apenas tienen efecto, excepto cuando la temperatura del ensayo sea cercana a la de fusión.

Sin embargo, se ha demostrado que los polímeros termoplásticos son muy dependientes de la temperatura y este efecto no solo es apreciable a temperaturas cercanas a su punto de fusión. Para los polímeros termoplásticos, la temperatura crítica que tiene más influencia en el comportamiento mecánico del mismo no es la temperatura de fusión si no la temperatura de transición T_g . Tal como está definido el término T_H en el modelo de Johnson-Cook, el efecto de la temperatura de transición pasa desapercibido, por lo que es necesario modificarlo. La necesidad de esta modificación tiene su origen en que el modelo de Johnson-Cook se concibió para modelizar metales, que no presentan esta temperatura de transición.

Otros estudios de otros polímeros termoplásticos han sido estudiados con este modelo y también han planteado soluciones al problema del término T_H . Como ejemplo, estudios sobre el polímero estructural ABS (Louche et al., 2009) han modificado el término sustituyendo la temperatura ambiente (T_{room}) por la temperatura de transición del polímero en la ecuación 13 de cálculo de T_H . Sin embargo, esta modificación solo plantea soluciones para temperaturas entre la de transición y la de fusión, sin definir el comportamiento a temperaturas inferiores a la temperatura de transición, que también son de interés de estudio.

De este modo, teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se plantea una modificación al término T_H que incluye todo el rango de temperaturas. Esta modificación pasa por sustituir la temperatura de fusión por la temperatura de transición como indica la siguiente ecuación:

$$T_H = \frac{T - T_{room}}{T_g - T_{room}} \quad [16]$$

Como consecuencia, para el caso del PEEK con una T_g de 143°C, el denominador será más pequeño que en el caso anterior, el valor de T_H es considerable y por lo tanto, el efecto de la temperatura será más acusado en la ecuación constitutiva de Johnson-Cook.

Para verificar la modificación realizada en el término T_H de la ecuación de Johnson-Cook, se ha realizado una serie de simulaciones numéricas con el objetivo de determinar cómo afecta la temperatura de fusión y de transición en la ecuación constitutiva de Johnson-Cook.

De manera más específica, esta comprobación consiste en realizar una simulación suprimiendo de la ecuación de Johnson-Cook los factores de la velocidad de deformación y temperatura para después introducir solo el efecto de la temperatura con el término T_H calculado según el modelo de Johnson-Cook original (Ecuación [13]) y otra con el término con la modificación (ecuación [16]).

Para la obtención de la curva tensión-deformación, se han tomado los valores de tensión y deformación calculados por Abaqus en la cara inferior de la viga, ya que en esta zona es donde se van a producir los mayores valores. Para ello, se ha definido un set de elementos en el programa de elementos finitos como indica la figura 5.2.1 y serán la fuente de los valores de estudio.

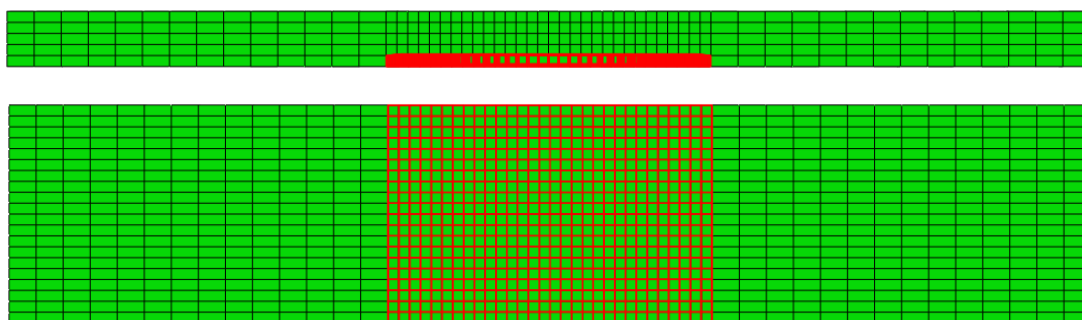


Figura 5.2. 1 – Detalle de los nodos estudiados para la curva tensión-deformación en el modelo numérico. Vista en alzado (arriba) y planta inferior (abajo).

En la realización de las distintas simulaciones, es necesario determinar las mismas condiciones de velocidad de impacto y temperatura de la viga. Para el caso de estudio, se han determinado:

$$v_{\text{impacto}} = 4 \frac{m}{s}$$

$$T = 298 K$$

a) Johnson-Cook sin efecto de velocidad de deformación ni temperatura:

Esta simulación servirá como referencia para la comparación de las siguientes. Como se han eliminado los factores de velocidad de deformación y temperatura, es necesario que en la definición del material en la simulación se consideren las constantes m y C , referentes a los factores de temperatura y velocidad de deformación respectivamente, iguales a cero para hacer efectiva esta eliminación.

De este modo la ecuación de Johnson-Cook sería la siguiente:

$$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_p) = [120 + 20(\bar{\epsilon}_p)^{0.36}] \quad [MPa] \quad [17]$$

b) Efecto de la temperatura modelo original con T_{melt} .

En esta simulación, se incluye el efecto de la temperatura a la ecuación con el término T_H calculado con la temperatura de fusión según el modelo original de Johnson-Cook (Ecuación [13]). Para reproducir este estado en el modelo numérico, es necesario incluir la constante m e introducir la $T_{melt} = 616 \text{ K}$.

La ecuación de Johnson-Cook es la siguiente:

$$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_p, T) = [120 + 20(\bar{\epsilon}_p)^{0.36}][1 - T_H^{0.88}] \quad [MPa] \quad [18]$$

Con:

$$T_H = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad [13]$$

c) Efecto de la temperatura modelo modificado con T_g .

Por último, esta simulación modifica la anterior en el parámetro T_H que se denominará T_H^* para diferenciarlo. Para reproducir este estado en el modelo numérico, es necesario introducir $T_g = 416 \text{ K}$ en el apartado donde se requiere la temperatura de fusión, así la modificación será efectiva.

La ecuación de Johnson-Cook es la siguiente:

$$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_p, T) = [120 + 20(\bar{\epsilon}_p)^{0.36}][1 - T_H^{*0.88}] \quad [MPa] \quad [19]$$

Con:

$$T_H^* = \frac{T - T_{room}}{T_g - T_{room}} \quad [16]$$

Más adelante, en el apartado 6.1, se visualizarán y analizarán los resultados de estas simulaciones con el objetivo de determinar la validez de la modificación propuesta.

5.3. Descripción del modelo analítico.

A su vez, el modelo numérico debe validarse asegurando su concordancia con el modelo analítico y este validarse con alguna información real experimentada del ensayo, del material o las condiciones. En esta parte la explicación se centrará en el modelo analítico.

Al tratarse de un ensayo llevado a cabo con impactos a velocidades medias, las ecuaciones de la Resistencia de Materiales pueden ser utilizadas. Antes de proceder a realizar el modelo matemático, es necesario modelizar la realidad en un modelo físico que describa las condiciones del proceso.

Así pues, el ensayo de flexión en tres puntos se puede sustituir, a todos los efectos de cálculo, por una viga biapoyada en sus extremos, sometida a una fuerza puntual en el punto medio de la misma, la figura 5.3.1 representa lo anteriormente descrito:

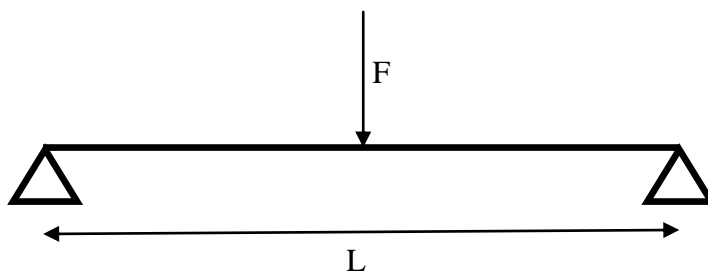
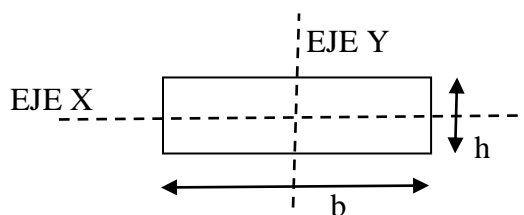


Figura 5.3. 1 – Modelo físico del ensayo de flexión en tres puntos.

Los apoyos de los extremos restringen el movimiento vertical y simulan la sustentación de la viga en la máquina. En cuanto a la viga, se debe definir la geometría de la sección y longitud. Para el caso de estudio, se trata de una viga de sección rectangular, de base 20mm y altura 5mm, con una longitud entre apoyos de 100mm.



Base sección (b)	Altura sección (h)	Distancia entre apoyos (L)
20mm	5mm	100mm

Figura 5.3. 2 y Tabla 5.3.1 – Detalle de las dimensiones de la sección transversal de la viga.

Una vez terminado el modelo físico del sistema, se procede al cálculo del modelo matemático según las ecuaciones de la Resistencia de Materiales.

El procedimiento de validación del modelo numérico se realizará en términos de la fuerza aplicada en el límite elástico, momento en el que el material comienza a plastificar. Esta fuerza aplicada en el impacto, que produce la plastificación, es la causante de los esfuerzos internos de la viga que provocan tensiones superiores a la del límite elástico del material.

Se han investigado otros modelos analíticos en ensayos de flexión en tres puntos en términos de la deflexión máxima de la viga (Seong Sik Cheon et al., 1999) el cual permite conocer el valor de la misma a lo largo del tiempo en función de la velocidad de impacto. Para ello necesita que el esfuerzo predominante durante el ensayo sea esfuerzo de cortadura, hipótesis válida para vigas de corta luz (~50 mm.) valor que no cumple el caso de estudio de este trabajo, por lo que la hipótesis de esfuerzo cortante no sería válida, como se demostrará más adelante.

En el modelo físico anteriormente descrito, donde una fuerza puntual se aplica en el punto medio del vano de la viga, los esfuerzos que sufre el elemento son principalmente momentos flectores. La fuerza puntual también produce esfuerzos cortantes que son despreciables con respecto al momento flector generado en la viga de estudio. Para ver si esta simplificación es válida en este caso, se calculará la relación entre esfuerzos producidos por la flexión y por el cortante.

Para calcular el momento flector en la barra que crea las mayores tensiones, es necesario calcular la ley de momentos flectores a lo largo de toda la longitud de la viga. Para el caso de una viga biapoyada sometida a una carga puntual en su punto medio, esta ley o diagrama de momentos flectores es siempre la siguiente:

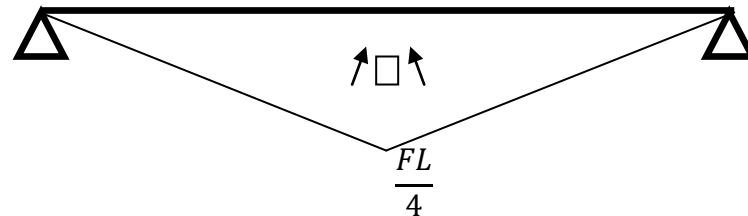


Figura 5.3. 3 – Diagrama de esfuerzos flectores en la viga indicando momento flector máximo.

Así pues, el momento flector máximo se da en el punto de aplicación de la carga puntual, en este caso en $x=L/2$, y tiene un valor de $FL/4$.

Este momento flector, como cualquier otro, genera tensiones normales a la sección de la viga, de tal forma que, para el caso de estudio, las fibras de las capas superiores estarán comprimidas y las fibras de las capas inferiores estarán traccionadas.

La ecuación de Resistencia de Materiales que permite calcular las tensiones normales producidas por momento flector es la siguiente:

$$\sigma = \frac{M_f y}{I} \quad [20]$$

Donde:

- σ es la tensión normal [Pa].
- M_f es el momento flector [Nm].
- y es la altura de la sección calculada con respecto al eje de giro [m].
- I es el momento de inercia de la sección transversal [m⁴].

De este modo, el diagrama de tensiones normales a la sección transversal de la viga como consecuencia del momento flector es el siguiente:

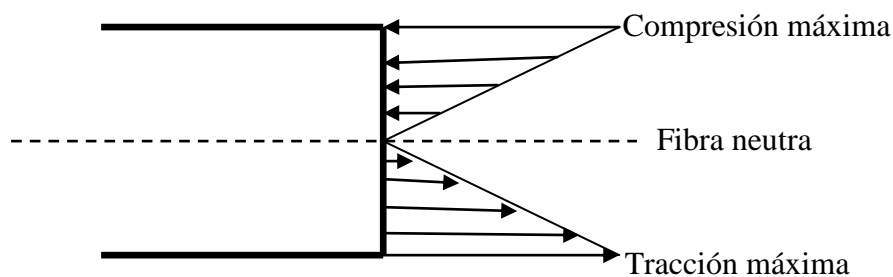


Figura 5.3. 4 – Diagrama de tensiones normales a la sección de la viga producidas por la flexión.

Como resultado, las tensiones normales máximas sufridas por la sección transversal en función de la fuerza aplicada, F , tienen lugar en los extremos de la misma: en $y = -0,0025\text{m}$, en la capa más inferior, tensión normal de tracción máxima; en $y = 0,0025\text{m}$, en la capa más superior, tensión normal de compresión máxima. En el caso de estudio, al tratarse de una sección rectangular simétrica, las tensiones máximas de compresión y de tracción tienen el mismo valor:

$$\sigma_{max} = \frac{M_f \cdot 0,0025}{I} = 1,2 \cdot 10^7 M_f = 3 \cdot 10^5 F \quad [21]$$

Donde:

- I es el momento de inercia de la sección rectangular, calculada como:

$$I = \frac{1}{12} b h^3 = 2,08 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4 \quad [22]$$

Por otro lado, los esfuerzos cortantes sobre la viga generan tensiones tangenciales a lo largo de la sección transversal de la misma. Para calcular el valor máximo de la tensión tangencial, es necesario obtener la ley o diagrama de esfuerzos cortantes que, para una viga biapoyada sometida a una carga puntual en el punto medio, es de la siguiente forma:

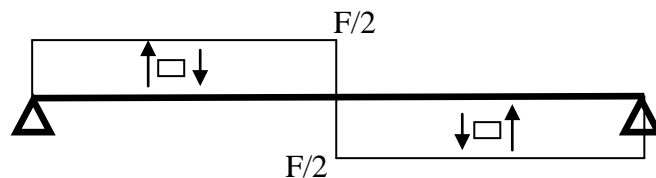


Figura 5.3. 5 – Diagrama de esfuerzo cortante en la viga indicando valores máximos.

En este caso, el valor del cortante es constante a lo largo de la longitud de la viga, pero de distinto signo en las dos mitades de la viga. Por tanto, el valor máximo del esfuerzo cortante, que dará lugar al valor máximo de las tensiones tangenciales es $Q_{max} = F/2$.

Como se ha dicho anteriormente, este esfuerzo cortante genera una tensión tangencial en la sección transversal de la viga, siguiendo la ecuación de la Resistencia de Materiales:

$$\tau = \frac{Q \cdot m_e}{b(y)I} \quad [23]$$

Donde:

- τ es la tensión tangencial [Pa].
- Q es el valor del esfuerzo cortante [N].
- m_e es el momento estático a la altura determinada de la sección [m³].
- $b(y)$ es la anchura de la sección en esa altura con respecto al eje de giro [m].
- I es el momento de inercia [m⁴].

Calculada la anterior expresión para una sección rectangular constante en anchura, queda:

$$\tau = \frac{6Q\left(\frac{h^2}{4} - y^2\right)}{bh^3} \quad [24]$$

Donde:

- h es la altura de la sección transversal [m].
- y es la altura de la sección con respecto al eje de giro donde se calcula la tensión [m].
- b es la anchura de la sección transversal [m].

De esta ecuación se deduce que la tensión tangencial es cero en los extremos ($y = \pm 0.0025m$) y máxima en el centro ($y = 0m$).

Análogamente al momento flector, se obtiene un diagrama de tensiones tangenciales a lo largo de la sección, como muestra la siguiente figura:

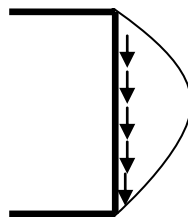


Figura 5.3. 6 – Diagrama de tensiones tangenciales en la sección de la viga por cortante.

Finalmente, el valor máximo de la tensión tangencial debido al esfuerzo cortante en función de la fuerza aplicada ,F, es:

$$\tau_{max}(0) = \frac{3Q}{2bh} = \frac{3F}{4bh} = 7,5 \cdot 10^3 F \quad [25]$$

Una vez calculadas las tensiones máximas en función de la carga aplicada F , generadas tanto por esfuerzo cortante y momento flector, se observa que el valor de la tensión normal debido al flector es mucho mayor (del orden de 40 veces) que la tensión tangencial debido al cortante para esta sección y longitud de viga. Por lo tanto, la simplificación realizada para el cálculo de la plastificación es correcta.

Como la validación del modelo se comprobará en el punto de plastificación, partiendo de la zona de comportamiento elástico del material, este punto está definido por la deformación o la tensión en el límite elástico según la curva σ - ϵ . Esta tensión del límite elástico puede ser expresada en términos del momento flector máximo que la causa:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{f,m\acute{a}x}y}{I} = \frac{M_{f,m\acute{a}x}}{I} \frac{h}{2}$$

A su vez, el momento flector máximo es causado por la fuerza aplicada siguiendo la expresión obtenida en el diagrama de momentos flectores, por lo que la tensión dependiente de la fuerza aplicada queda de la siguiente forma:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F \frac{L}{4} \frac{h}{2}}{I}$$

Como la tensión que produce la plastificación es la necesaria para la validación, la anterior ecuación se caracteriza para el límite elástico como sigue:

$$\sigma_y = \frac{F_y \frac{L}{4} \frac{h}{2}}{I}$$

Siendo F_y la fuerza de impacto que produce la plastificación.

Gracias a los ensayos experimentales del PEEK realizados en otros estudios como (Rae et al., 2007) es posible determinar la influencia de la temperatura en valores característicos del material como el límite elástico y el módulo de Young. Para poder introducir este efecto de la temperatura en el modelo analítico, se ha modificado la ecuación anterior para ser expuesta en términos de la deformación en vez de la tensión, mediante la relación de la Ley de Hooke:

$$\frac{\sigma_y}{E(T)} = \frac{F_y \frac{L}{4} \frac{h}{2}}{I \cdot E(T_0)}$$

Donde $E(T)$ y $E(T_0)$ son los valores del módulo de Young para las temperaturas final e inicial del proceso respectivamente, obtenidas de los estudios de (Rae et al., 2007).

Finalmente, la ecuación que rige el modelo analítico y que determina la fuerza necesaria para la plastificación de la viga en función del límite elástico es la siguiente:

$$F_y = \frac{E(T_0)}{E(T)} \frac{\sigma_y I}{\frac{L}{4} \cdot \frac{h}{2}} \quad [26]$$

5.4. Procedimiento de validación del modelo numérico.

Con el objetivo de hacer válido el modelo numérico utilizado para las simulaciones, es necesario comprobar que los resultados que ofrecen se adecúan a la realidad.

Como se ha expuesto en el apartado anterior, la validación del modelo se realizará en términos de la fuerza aplicada necesaria para la plastificación. Para ello, se han realizado distintas simulaciones del modelo en las que se ha variado la velocidad de impacto del percutor. Las velocidades de las simulaciones son 6 m/s y 8 m/s, velocidades suficientemente altas para llegar a la plastificación.

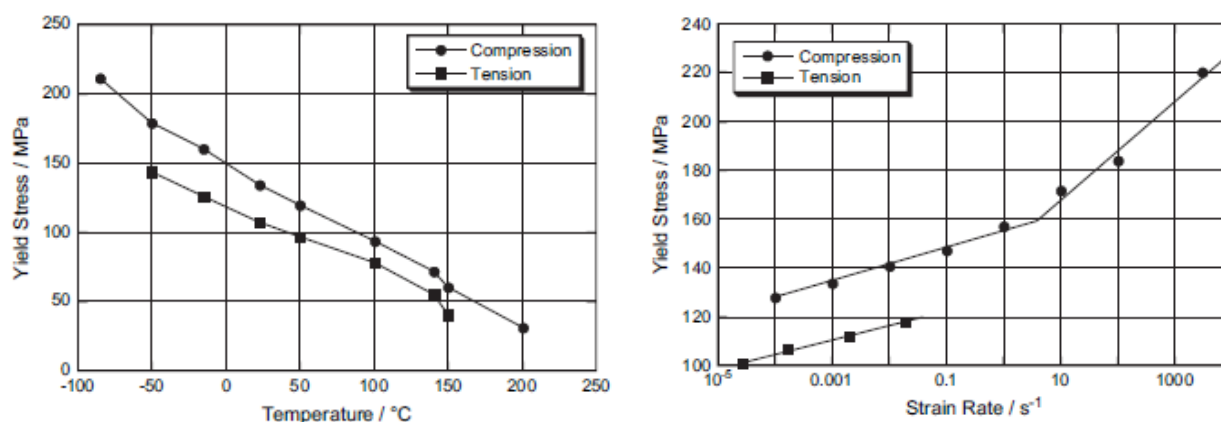
Además, la temperatura del elemento ha sido estudiada en un rango entre -25°C y 200°C, en intervalos de 25°C para cada simulación.

Para determinar la influencia de la temperatura de fusión y transición en el término T_H de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook, siguiendo lo propuesto en el apartado 5.2.1, se ha realizado este proceso tanto para el caso en el que el término no se modifica, es decir, $T_{\text{melt}} = 616 \text{ K}$, y para el caso con el término modificado, con $T_{\text{melt}} = T_g = 416 \text{ K}$.

La validación por lo tanto, consistirá en comparar los resultados de la fuerza de plastificación calculada mediante el modelo numérico y mediante el modelo analítico.

a) Fuerza de plastificación en el modelo analítico.

El modelo analítico permite obtener un valor de la fuerza de plastificación en función del límite elástico gracias a los resultados obtenidos por (Rae et al., 2007). En ellos, se comprueba que existe una relación directa y determinante entre la temperatura y velocidad de deformación del PEEK y su límite elástico. Por ello, para cada simulación a una temperatura y velocidad de impacto dadas, existe un valor del límite elástico diferente. Los resultados de la dependencia del límite elástico del PEEK en función de la velocidad de deformación y de la temperatura son los siguientes:



Gráfica 5.4.1 y Gráfica 5.4.2 – Variación del límite elástico del PEEK en función de la temperatura (izquierda) y de la velocidad de deformación (derecha) (Rae et al., 2007).

A partir de la influencia de la temperatura y la velocidad de deformación para unas condiciones determinadas por separado, se ha obtenido una expresión analítica que permite obtener el valor del límite elástico en función de los valores de velocidad de deformación y temperatura simultáneamente. El método de obtención de esta relación consiste en ajustar el valor del límite elástico a una expresión del siguiente tipo:

$$\sigma_y(\dot{\epsilon}, T) = a\dot{\epsilon} - bT \quad [27]$$

Donde a y b son unos parámetros de ajuste en función de gráficas independientes de Rae.

El signo negativo del segundo término tiene su origen en el hecho que, como demostró Rae, la temperatura disminuye el valor del límite elástico mientras que la velocidad de deformación lo aumenta, como se muestra en las Gráficas 5.4.1 y 5.4.2.

Los valores estudiados de las gráficas son los pertenecientes al ensayo de compresión ya que es el que más se asemeja al impacto.

En la gráfica que representa el límite elástico en función de la velocidad de deformación (Gráfica 5.4.2) se observan claramente dos regiones con distinta pendiente, con punto de inflexión aproximadamente en $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$. Por ello, se separará el ajuste para estas dos zonas.

Para realizar el ajuste lo más preciso posible se ha considerado que los coeficientes relativos a cada variable son a su vez dependientes del valor de la misma en cada punto, es decir, se ha obtenido una tabulación del parámetro b para cada temperatura y una expresión matemática del parámetro a para cada velocidad de deformación.

Finalmente, el resultado del ajuste, que permite obtener el valor del límite elástico en función de la velocidad de deformación y la temperatura conjuntamente es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 a &= 290.85\dot{\epsilon}^{-0.989} & \text{si } \dot{\epsilon} \leq 1s^{-1} \\
 a &= 284.19\dot{\epsilon}^{-0.972} & \text{si } \dot{\epsilon} > 1s^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

T [K]	b	T [K]	b
187.6	0.31173	322.6	0.46646
198.9	0.34429	339.1	0.46735
209.6	0.37443	358.8	0.46957
222	0.40757	372.6	0.47499
234	0.41231	386	0.4743
246.5	0.4198	399	0.47739
257.9	0.42451	413	0.47913
272.217	0.43891	419	0.48802
282.94	0.45055	423	0.49593
294.9	0.45941	438	0.49881
306.2	0.46205	456	0.50127
314.6	0.46243	473	0.50461

Tabla 5.4. 1 – Valores de la constante de ajuste del término de la temperatura en función de la misma.

Una vez obtenida la expresión del límite elástico bajo cualquier estado, se puede proceder a la validación.

Para cada simulación realizada en Abaqus, a una temperatura y velocidad dadas, es necesario determinar la velocidad de deformación para obtener el límite elástico en ese estado. Para determinar la velocidad de deformación de la simulación, es necesario que se produzca deformación plástica en la viga. Así pues, mediante herramientas de Abaqus se puede obtener el valor de la deformación plástica y la zona donde se produce. Para obtener un valor global, se ha representado el valor medio de la deformación plástica en función del tiempo en cada simulación en un conjunto de nodos traccionados de la cara inferior, que son los que más tensión sufren.

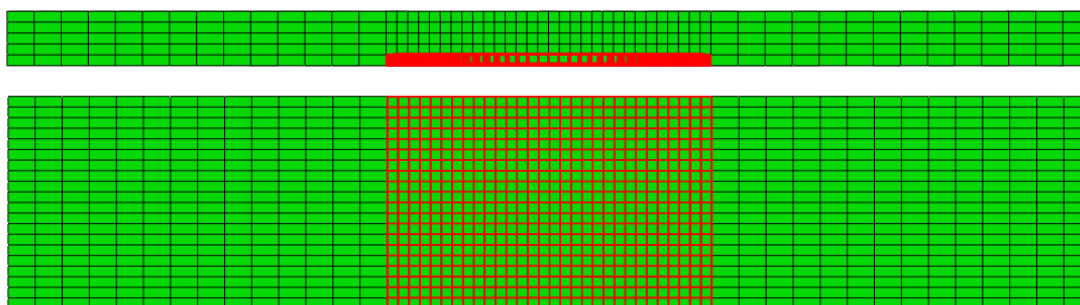
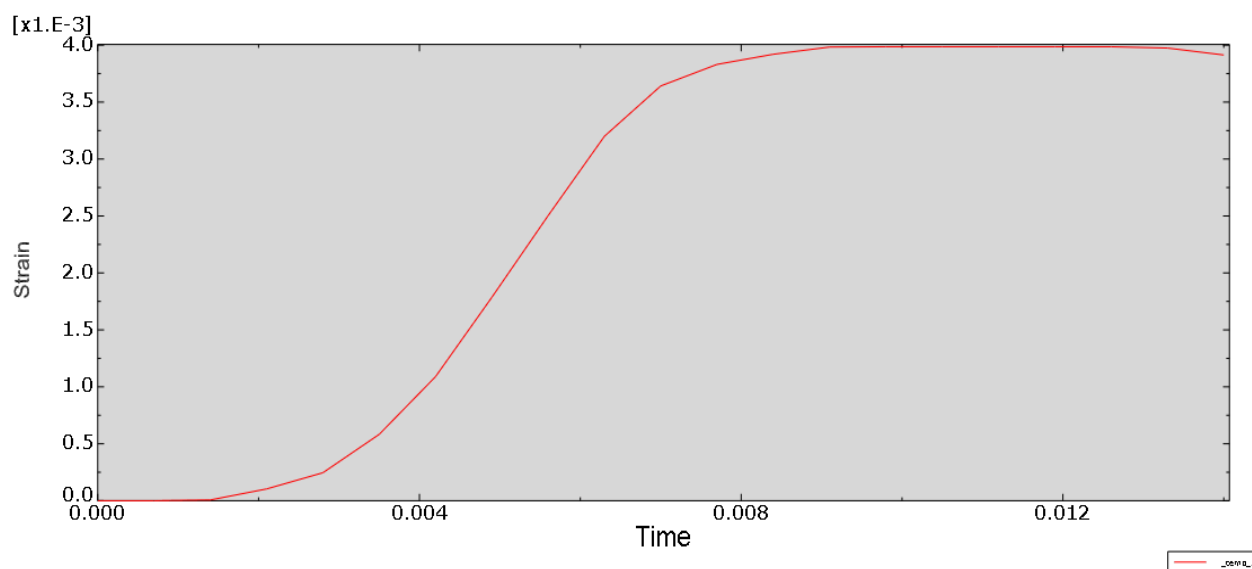


Figura 5.4.1 – Detalle de los nodos estudiados para la velocidad de deformación en el modelo numérico. Vista en alzado (arriba) y planta inferior (abajo).

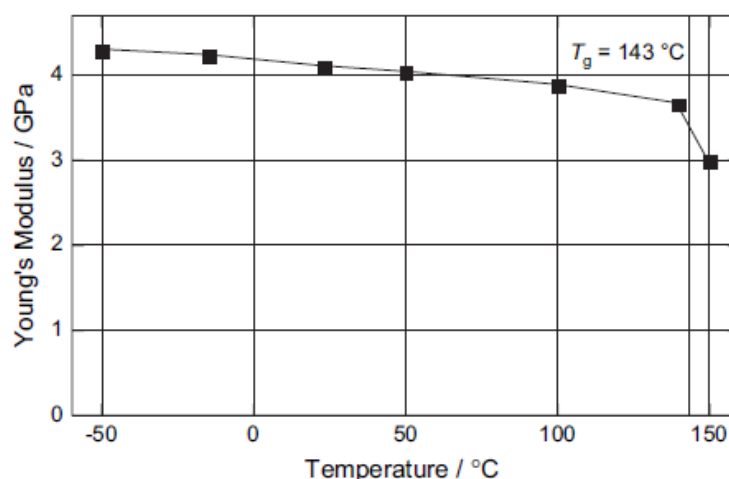


Gráfica 5.4. 3 – Curva deformación plástica-tiempo típica media de los nodos de la Figura 5.4.1 obtenida del modelo numérico tras una simulación.

A partir de la curva anterior, se obtiene el valor de velocidad de deformación de cada simulación. Con este valor y el de la temperatura inicial del PEEK, que está impuesta en cada simulación por lo tanto es conocida, se calcula el valor del límite elástico de la viga para esas condiciones según las ecuaciones [27] y [28] y la Tabla 5.4.1.

Habiendo calculado el valor del límite elástico, se introduce el mismo en la Ecuación [26] del modelo analítico.

Por último, se comprueba el valor de la temperatura final del elemento mediante el modelo numérico y obtienen los valores del módulo de Young correspondientes según los resultados del estudio de Rae:



Gráfica 5.4. 4 – Variación del módulo de elasticidad del PEEK frente a la temperatura (Rae et al., 2007).

De este modo, ya se han obtenido todas las variables $E(T)$, $E(T_0)$ y $\sigma_y(\dot{\epsilon}, T)$ características de cada simulación que determinan el valor de la fuerza necesaria para la plastificación según el modelo analítico y la ecuación [26].

b) Fuerza de plastificación en el modelo numérico.

El programa de elementos finitos permite calcular el valor de la fuerza aplicada en cada instante de tiempo. Como el objetivo es determinar la fuerza que produce la plastificación, será necesario evaluarla en ese punto. El punto de plastificación se determina recurriendo al modelo analítico.

El valor del límite elástico obtenido en el modelo analítico sirve como referencia para determinar el punto de plastificación en el modelo numérico. Obteniendo el campo de tensiones en función del tiempo mediante Abaqus, se puede determinar el punto donde se alcanza la tensión del límite elástico para cada simulación obtenida en el paso anterior.

Así pues, en el instante de tiempo donde se alcanza dicha tensión será el punto donde comienza la plastificación y aquel donde se debe evaluar la fuerza aplicada. La fuerza aplicada es igual al valor de la suma de las reacciones en los apoyos, que será la suma de las reacciones de los nodos situados en las inmediaciones de ambos apoyos.

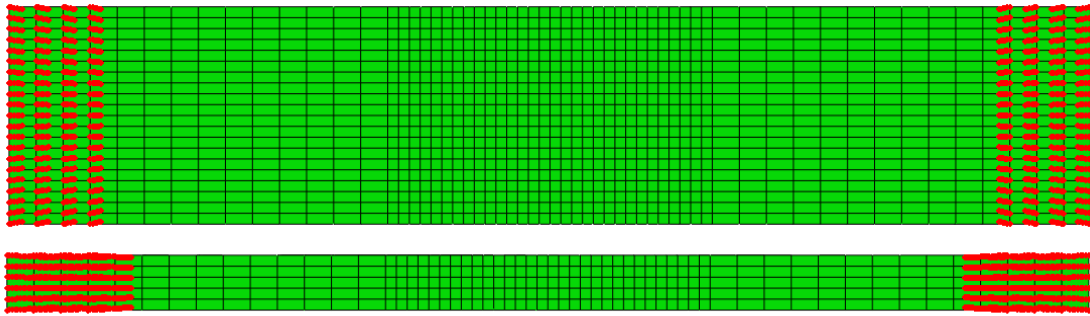
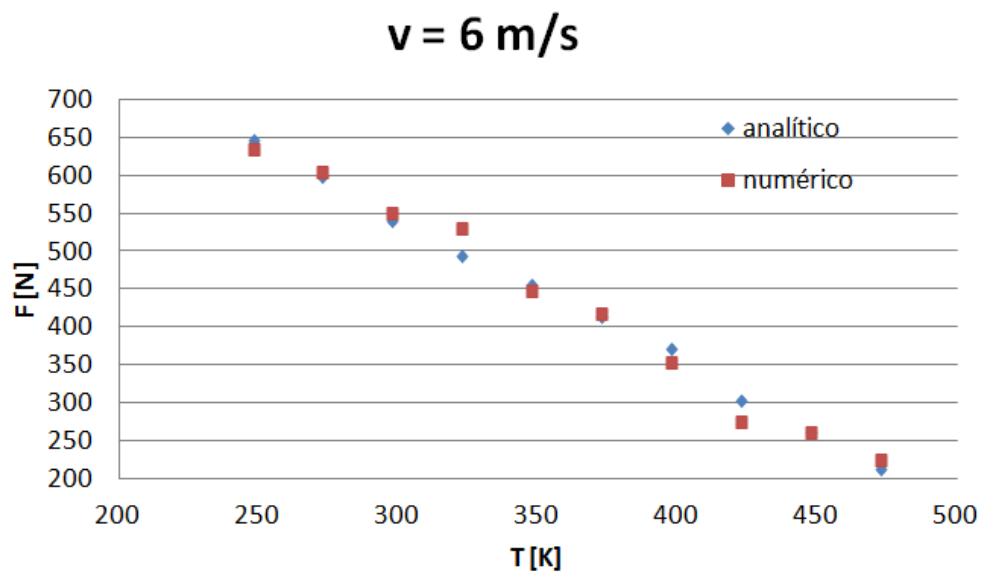
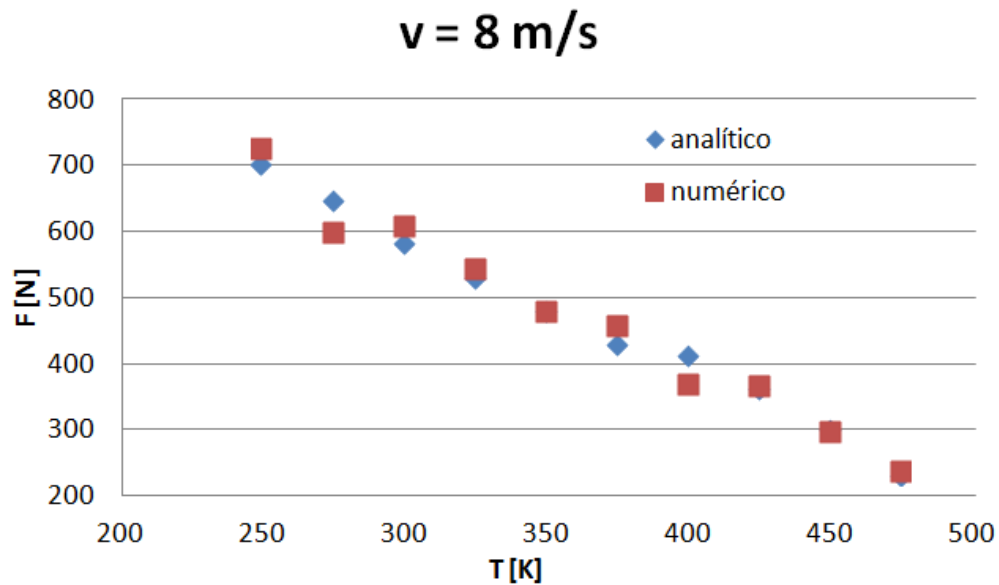


Figura 5.4. 2 – Detalle de los nodos estudiados para las reacciones en los apoyos en el modelo numérico. Vista en alzado (abajo) y planta (arriba).

Una vez expuestos los métodos de obtención de la fuerza de plastificación tanto por el modelo analítico como el numérico, se presentan los resultados obtenidos para las diferentes simulaciones con temperatura del modelo de Johnson-Cook de 416 K (Ecuación [16]):

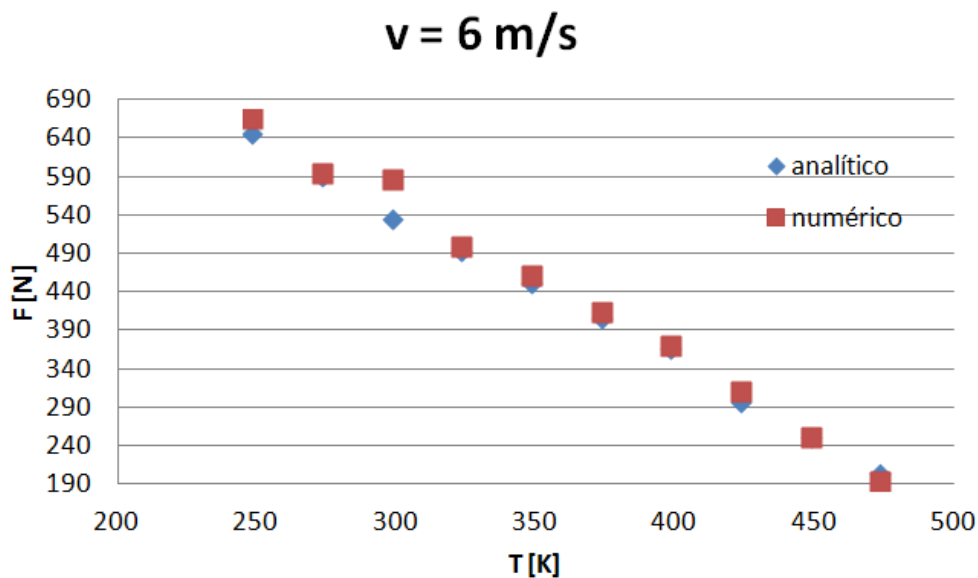


Gráfica 5.4. 5 – Comparación resultados modelo analítico y numérico de la fuerza de plastificación en función de la temperatura para una velocidad de impacto de 6 m/s y con la temperatura de transición ($T_g = 416 \text{ K}$) en el término T_H de ecuación de Johnson-Cook (Ecuación [16]).

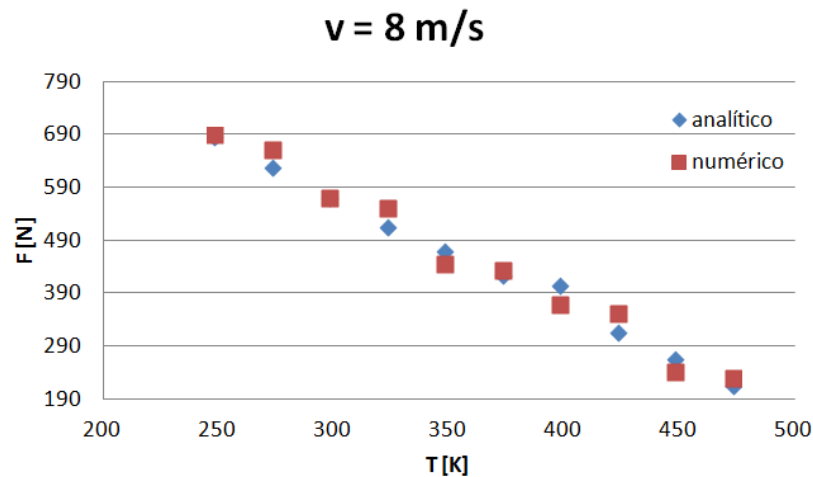


Gráfica 5.4. 6 – Comparación resultados obtenidos del modelo analítico y numérico de la fuerza de plastificación en función de la temperatura para una velocidad de impacto de 8 m/s y con la temperatura de transición ($T_g = 416 \text{ K}$) en el término T_H de ecuación de Johnson-Cook (Ecuación [16]).

Los resultados obtenidos para las diferentes simulaciones con temperatura del modelo de Johnson-Cook de 616 K (Ecuación [13]) son:



Gráfica 5.4. 7 – Comparación resultados modelo analítico y numérico de la fuerza de plastificación en función de la temperatura para una velocidad de impacto de 6 m/s y con la temperatura de fusión ($T_{melt} = 616 \text{ K}$) en el término T_H de ecuación de Johnson-Cook (Ecuación [13]).



Gráfica 5.4. 8 – Comparación resultados modelo analítico y numérico de la fuerza de plastificación en función de la temperatura para una velocidad de impacto de 8 m/s y con la temperatura de fusión ($T_{melt} = 616 \text{ K}$) en el término T_H de ecuación de Johnson-Cook (Ecuación [13]).

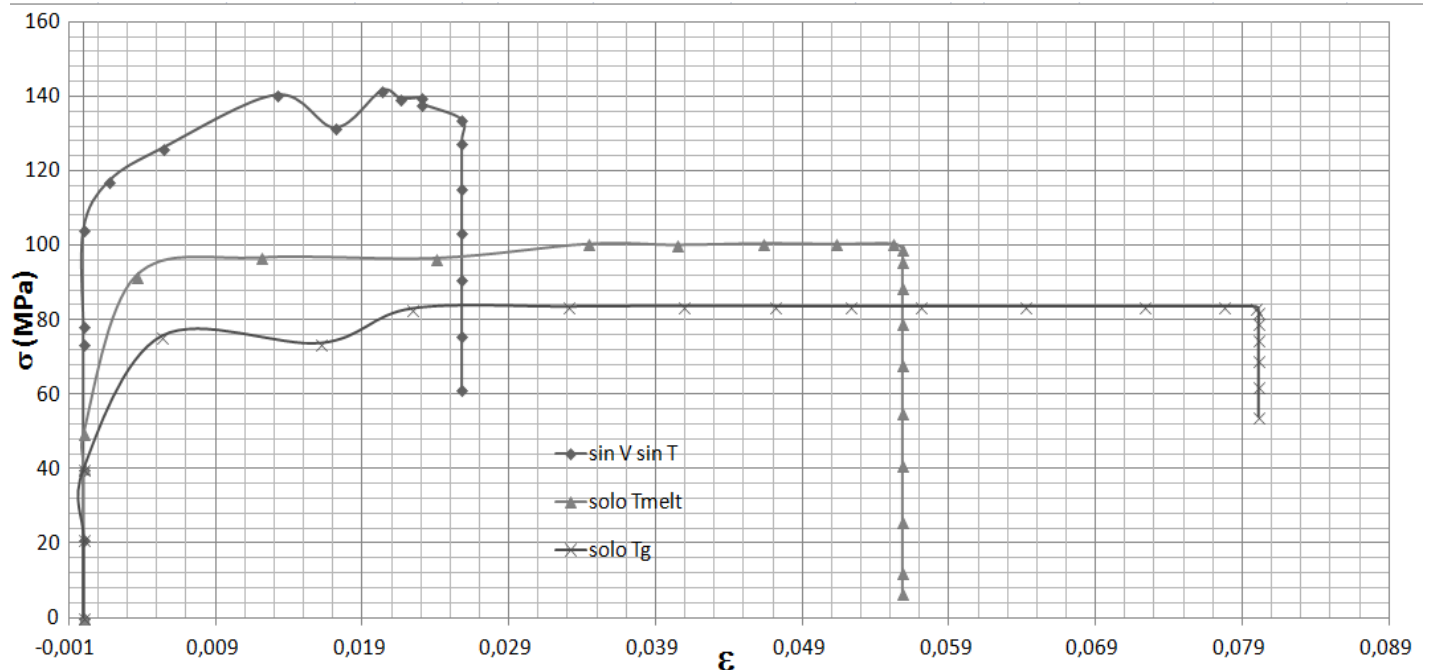
En función de los resultados obtenidos se puede concluir que la validación es satisfactoria ya que se producen resultados prácticamente idénticos con variaciones de no más del 8%.

Aunque la validación del modelo numérico es correcta siguiendo un modelo analítico veraz, sería conveniente realizar ensayos experimentales con esta configuración que permitan afianzar los resultados aquí obtenidos.

6. Análisis de resultados.

6.1. Influencia de la temperatura de transición vítrea.

Una vez realizadas las simulaciones descritas anteriormente en el apartado 5.2.1 para el análisis de la posibilidad de modificación del término T_H de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook, se han representado las curvas tensión-deformación obtenidas:



Gráfica 6.1. 1 – Curvas tensión-deformación para el PEEK sin efecto de los términos de Johnson-Cook, con solo el término de la temperatura para T_g y para T_{melt} a 298 K y 4 m/s de impacto del percutor.

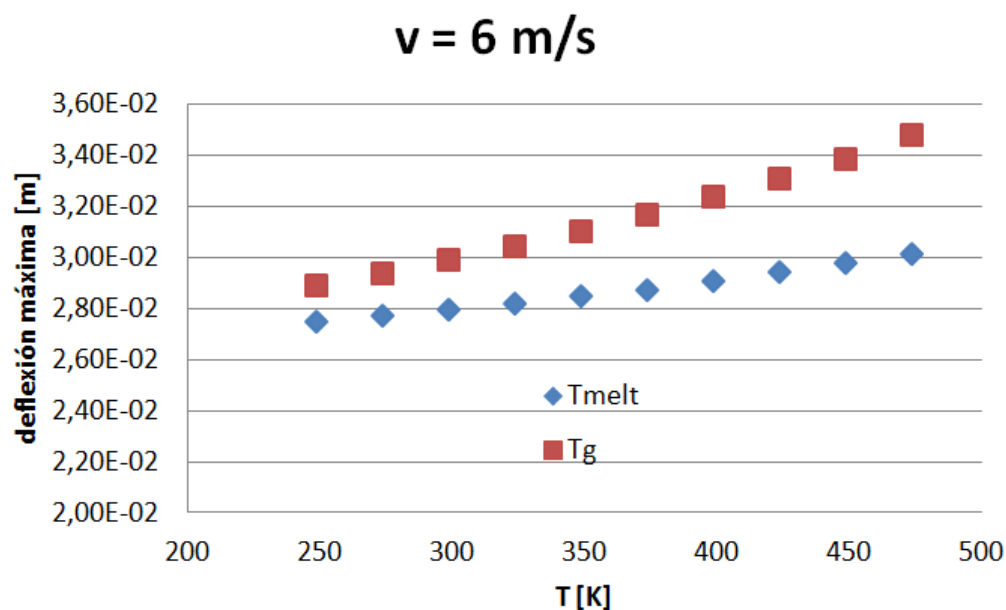
Teniendo en cuenta los resultados de esta comprobación, se aprecia como la inclusión de la temperatura de transición en el término T_H de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook provoca un ablandamiento y aumento de la tenacidad del material.

La temperatura de transición de los polímeros termoplásticos suele coincidir con el punto en el que el material pasa de un comportamiento dúctil a uno frágil. Es decir, que al sobrepasar esa temperatura, se debería observar una fragilización del material. Este efecto, en el caso de estudio, se debería traducir en una mayor rigidez de la viga, por lo tanto una disminución de la deflexión máxima. Así pues, cabría esperar este comportamiento a partir de la temperatura de transición dúctil-frágil del PEEK, $T_g = 416 \text{ K}$.

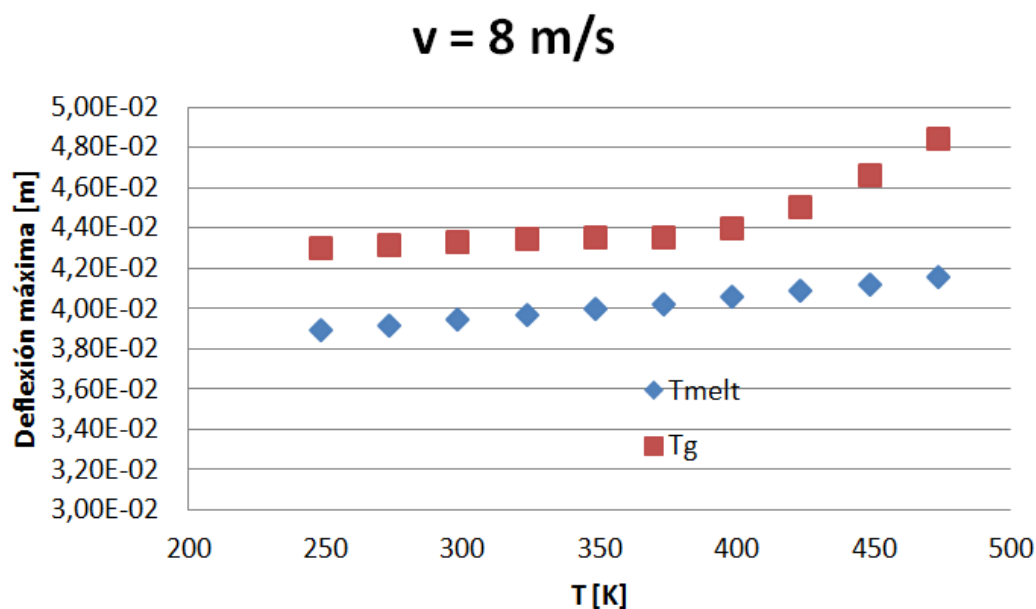
Sin embargo, otros estudios de impacto del PEEK, como el ensayo Taylor realizado por Millett et al. (Millett et al., 2006) parecen contradecir este hecho. El ensayo de Taylor llevado a cabo en el citado artículo, somete a barras de PEEK a impactos a altas velocidades. En estos impactos se alcanzan altas temperaturas, superiores a la temperatura de transición del material. A pesar de ello, una vez recogido los proyectiles se detectó que, aunque fracturado, esta rotura no era frágil sino dúctil. Este descubrimiento acredita el pensamiento de que no se produce esa transición a comportamiento frágil al superar la temperatura de transición vítrea del material, contrariamente a muchos otros polímeros similares al PEEK.

A partir de este ensayo, el comportamiento del PEEK debería esperarse más dúctil con un aumento de la temperatura, lo que significa un ablandamiento con mayores deformaciones y deflexiones máximas. Dado este hecho se comprueba que los resultados obtenidos en la validación y en la gráfica 6.1.1 de efecto de los factores de la ecuación de Johnson-Cook se adaptan y reproducen este comportamiento.

A continuación, se muestran graficados los valores de la deflexión máxima en el punto medio de la viga, obtenidos mediante el modelo numérico para el término T_H de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook sin modificar (Ecuación [13]) y modificado (Ecuación [16]).



Gráfica 6.1. 2 – Deflexión máxima de la viga para velocidad de impacto de 6 m/s con el término T_H modificado (T_g) y sin modificar (T_{melt}) en función de la temperatura.



Gráfica 6.1. 3 – Deflexión máxima de la viga para velocidad de impacto de 8 m/s con el término T_H modificado (T_g) y sin modificar (T_{melt}) en función de la temperatura.

En las gráficas 6.1.2 y 6.1.3 se observa como la deflexión máxima aumenta cada vez con mayor rapidez con la temperatura. Este efecto es más acusado aún en el caso en el que se ha realizado la modificación al término T_H (Ecuación [16]), donde se empieza a detectar en mayor medida el comportamiento dúctil del material al sobrepasar la temperatura de transición. Así pues, la modificación del término T_H reproduce mejor el paso a comportamiento dúctil en la temperatura de transición que el original, si bien es cierto que en ambos casos la temperatura juega un papel decisivo y determina el comportamiento del material.

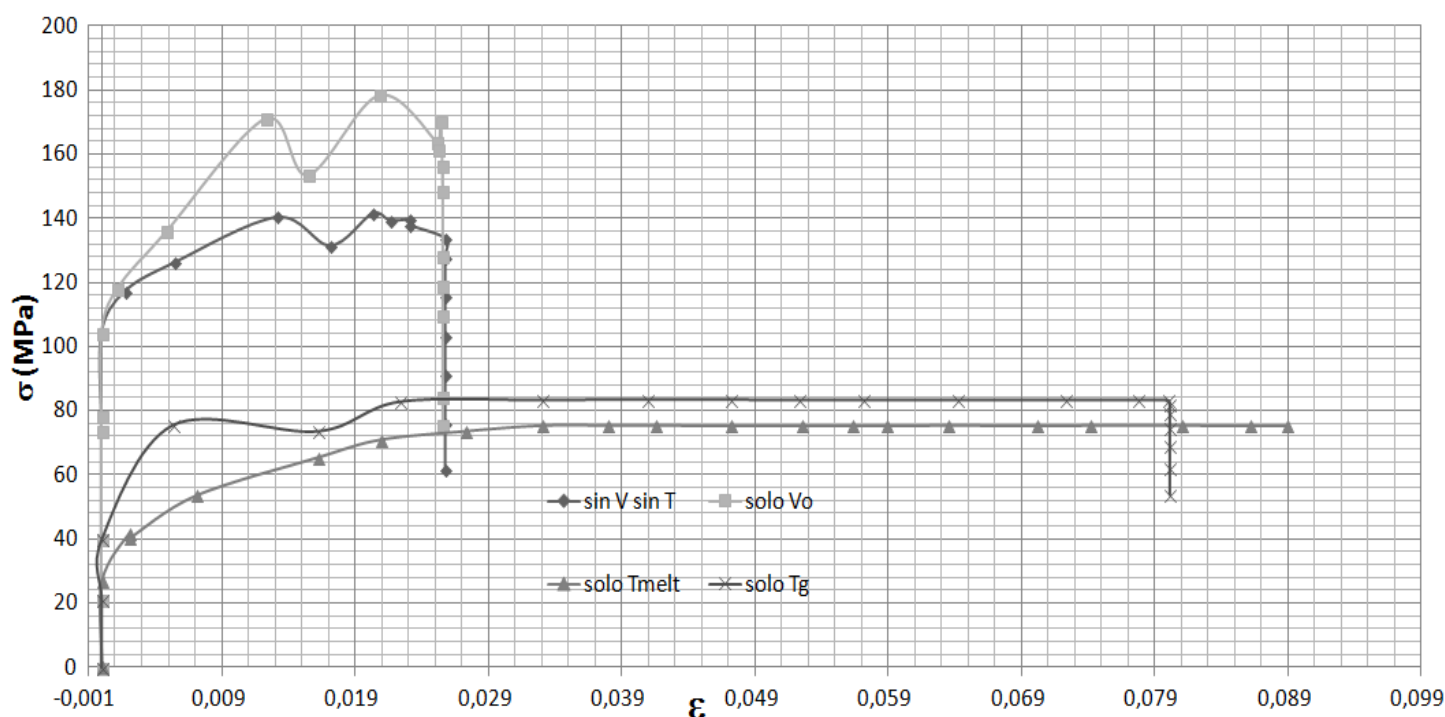
6.2. Influencia de la velocidad de deformación y la temperatura inicial.

Para continuar, se ha estudiado el efecto de todos los factores de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook. Anteriormente se han expuesto las curvas tensión-deformación resultantes de una simulación sin factores de velocidad de deformación ni temperatura y otras dos con el factor de temperatura original o modificado. De este modo, solo queda por comparar el efecto de la velocidad de deformación.

Al realizar esta simulación, se recurre a las condiciones del apartado 5.2.1 de análisis de la modificación del término T_H . Estas condiciones consisten en la velocidad de impacto y la temperatura de la viga, de 4 m/s y 298K respectivamente. En esta simulación no se tiene en cuenta el efecto de la temperatura por lo que en el Abaqus se introducirá el valor de la constante m igual a cero para reproducir esta eliminación.

Así pues, la ecuación constitutiva de Johnson-Cook incluyendo solo el efecto de la velocidad de deformación es la siguiente:

$$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_p, \dot{\bar{\epsilon}}_p) = [120 + 20(\bar{\epsilon}_p)^{0.36}] \left[1 + 0.04 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{0.015} \right) \right] \quad [29]$$



Gráfica 6.2. 1 – Comparación de las curvas tensión-deformación con la inclusión de los factores de velocidad de deformación y temperatura con el término T_H modificado (T_g) y sin modificar (T_{melt}) a 298 K y 4 m/s de velocidad de impacto.

A partir la gráfica 6.2.1 se observa cómo, en comparación con la simulación sin efecto de ninguno de los factores, la inclusión de la temperatura se traduce en una importante reducción de la resistencia mecánica o ablandamiento en beneficio de un gran aumento de la tenacidad. También es observable que, el factor de velocidad de deformación, produce un efecto de endurecimiento del material, aumentando su resistencia última considerablemente y a su vez, una fragilización del mismo, efecto opuesto al de la temperatura.

A partir de estas observaciones, es interesante poder determinar cuál de los dos efectos, que en la ecuación completa de Johnson-Cook están actuando a la vez, prevalece sobre el otro y determina en mayor medida el comportamiento mecánico del PEEK, con el objetivo de descubrir las condiciones donde el material sea más aprovechable.

Antes de comparar el efecto de la velocidad frente al de la temperatura, ha sido necesario determinar que la temperatura característica que rige el comportamiento del PEEK es su temperatura de transición. Con lo cual, la curva comparada será esta última con respecto a la velocidad.

Comparando la curva proveniente del efecto de la temperatura y de la velocidad (gráfica 6.2.1), se aprecia una variación de resistencia mecánica mayor (-60MPa aprox.) con el efecto de la temperatura, de signo negativo, que resulta en un ablandamiento del mismo, en comparación con el aumento (40MPa) producido en el endurecimiento por la velocidad de deformación. Además, se observa fácilmente que el aumento en la tenacidad teniendo en cuenta el efecto de la temperatura es mucho mayor que la disminución provocada por la velocidad de deformación. Estas observaciones tienden a determinar que el efecto de la temperatura y de la velocidad de deformación tienen el mismo grado de influencia aproximadamente sobre los resultados, es decir, no es posible afirmar que uno de los dos predomina sobre el otro.

6.2.1. Influencia de la velocidad de deformación.

El efecto del factor de la velocidad de deformación es consecuencia de la energía cinética producida en el impacto, que es directamente proporcional a la masa y velocidad de impacto. Por ello, es de interés conocer si esta energía, y por lo tanto su mayor efecto en el comportamiento del material, está comandada por la fuerza de inercia de la masa impactada o por la velocidad de impacto.

Para realizar esta comprobación, se han realizado distintas simulaciones con el modelo numérico y obtenido las curvas tensión-deformación resultantes. La primera de ellas consiste en ir aumentando progresivamente la velocidad de impacto, manteniendo fija la masa del percutor para observar únicamente los efectos que produce la velocidad. Para conseguir unos resultados comparables, todos ellos han realizado la simulación a la misma temperatura de 298 K.

Valores fijos	
T [K]	Masa [kg]
298	1.2

Tabla 6.2. 1 – Valores fijos de las variables de temperatura, densidad y masa del percutor para las simulaciones de variación de la velocidad de impacto.

Características simulaciones								
Velocidad impacto [m/s]	4	5	6	8	10	12	14	16
Energía cinética [J]	9.6	15	21.6	38.4	60	86.4	117.6	153.6
Simulación número	1	2	3	4	5	6	7	8

Tabla 6.2. 2 – Valores de la velocidad de impacto, energía cinética y numeración de la simulación para las simulaciones de variación de la velocidad de impacto con los valores fijos de la Tabla 6.2.1.

En la segunda simulación, se pretende estudiar el efecto de la masa del percutor en las mismas condiciones que las simulaciones anteriores con la velocidad. Para comparar adecuadamente ambos efectos, es necesario que en ambos casos la energía cinética total sea la misma, en el primer caso lo que varía es la velocidad y en este segundo, varía la masa hasta conseguir la misma energía cinética.

Para ello, se han utilizado las energías cinéticas producidas por cada una de las simulaciones anteriores al variar la velocidad y a partir de ellas, calculada la masa del percutor que es necesario para tener la misma energía si la velocidad no hubiese variado. Una vez obtenida la masa necesaria, se requiere determinar la densidad del percutor modelado en Abaqus para que reproduzca esta masa. Para facilitar la identificación, las simulaciones variando la velocidad y variando la masa del percutor se han identificado mediante un número de simulación, común para los casos donde la energía cinética es la misma. De este modo, las condiciones fijas de estas simulaciones y masas utilizadas en cada simulación son las siguientes:

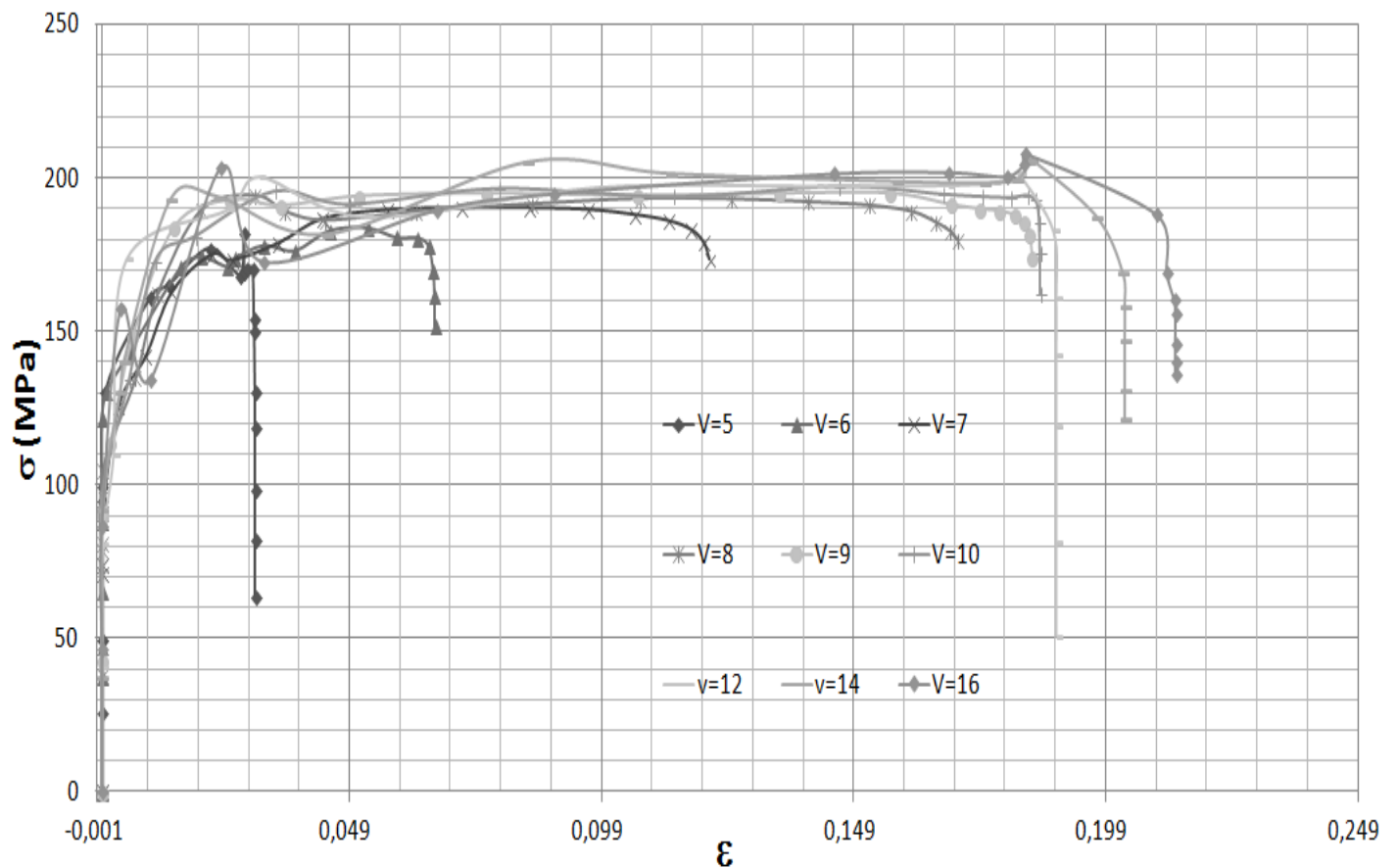
Valores fijos	
T [K]	V [m/s]
298	4

Tabla 6.2. 3 – Valores fijos de las variables de temperatura y velocidad de impacto para las simulaciones de variación de la masa del percutor.

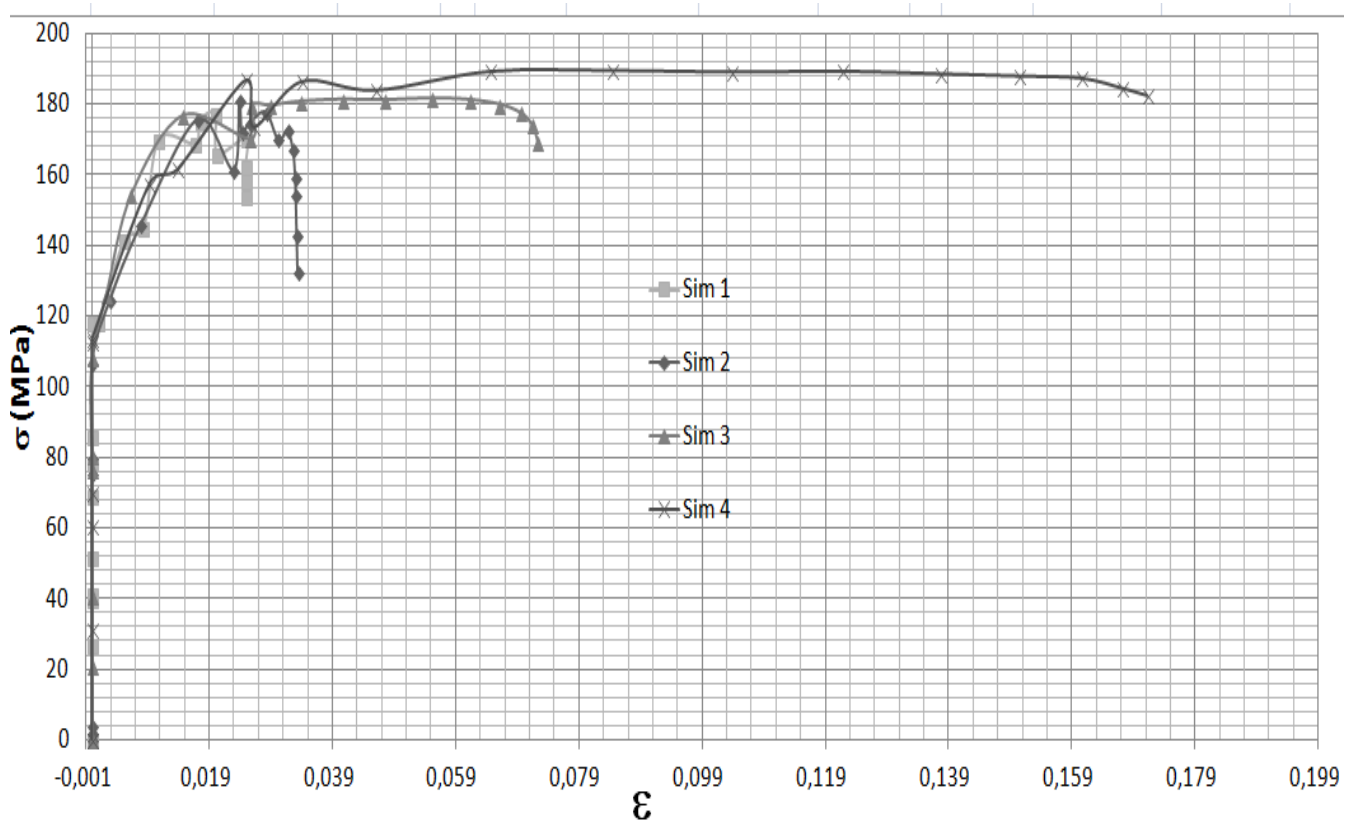
Características simulaciones								
Energía cinética [J]	9.6	15	21.6	38.4	60	86.4	117.6	153.6
Masa [kg]	1.2	1.875	2.7	4.8	7.5	10.8	14.7	19.2
Simulación número	1	2	3	4	5	6	7	8

Tabla 6.2. 4 – Valores de la masa, energía cinética y numeración de la simulación provenientes de la Tabla 6.2.2 para las simulaciones de variación de la masa con los valores fijos de la Tabla 6.2.3.

Finalmente, las curvas tensión-deformación obtenidas en cada simulación se presentan a continuación. Todas ellas no tienen en cuenta el efecto de la temperatura, por lo que el factor dependiente de la temperatura en la ecuación constitutiva de Johnson-Cook ha sido suprimido de la definición del material.



Gráfica 6.2. 2 – Curvas tensión-deformación para distintas velocidades de impacto con las condiciones de las Tablas 6.2.1 y 6.2.2.



Gráfica 6.2. 3 – Curvas tensión-deformación para los distintos números de simulación con las condiciones de la Tablas 6.2.3 y 6.2.4.

A partir de los resultados obtenidos representados en la gráfica 6.2.2 y 6.2.3, se observa como el aumento de la velocidad de impacto produce un aumento en la tenacidad del material, si bien la resistencia mecánica se mantiene prácticamente constante.

Además, el efecto del aumento de la masa del percutor es similar al efecto de aumentar la velocidad de impacto, salvo un pequeño aumento en la tenacidad con respecto a la variación de velocidad.

Estas observaciones determinan que el efecto de la velocidad de impacto o de la masa impactada no prevalece uno sobre el otro, si no que las variaciones en el comportamiento del material vienen definidas por la energía cinética en el impacto global.

6.2.2. Influencia de la temperatura inicial.

Estudiar el efecto de la temperatura en el comportamiento mecánico de un material es fundamental para conocer con exactitud las capacidades y aplicaciones posibles del mismo.

Tal es la importancia que ha despertado el interés por conocer el efecto de la temperatura en las propiedades del PEEK y existen investigaciones realizadas al respecto (Rae et al., 2007) (Millett et al., 2006) (Sinmazçelik et al., 2007).

Como se ha expuesto anteriormente, se conoce el efecto de la temperatura en propiedades mecánicas del PEEK como el límite elástico (gráficas 5.4.1 y 5.4.2) y el módulo de elasticidad (gráfica 5.4.4) (Rae et al., 2007). A partir de estos resultados, es claramente observable que el aumento de la temperatura se traduce en una constante pérdida de resistencia y rigidez del PEEK. Este efecto se ve representado en una mayor deflexión del punto medio de la viga en las simulaciones realizadas en este trabajo.

Los resultados obtenidos en las simulaciones plasman esta pérdida de capacidad mecánica a la vez que se aprecia un aumento de la tenacidad. Este hecho permite afirmar que la capacidad de absorción de energía del PEEK aumenta con la temperatura ya que disminuye el módulo de elasticidad y favorece a mejorar la capacidad de absorción de energía (Sinmazçelik et al., 2007), hecho que apoya su posible aplicación en sistemas de protección y refuerzo ante impactos.

Observando los resultados obtenidos en las simulaciones, se observa también, habiendo modificado el término T_H , de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook, una transición a comportamiento más dúctil del PEEK al sobrepasar la temperatura de transición vítrea del mismo (T_g). Este hecho, investigado por otros autores (Millett et al., 2006) conduce al pensamiento de que no existe rotura frágil del PEEK bajo efecto de la temperatura.

7. Marco regulador.

El estudio aquí presentado sirve como inicio de un amplio número de investigaciones y estudios sobre el comportamiento del PEEK en condiciones de flexión dinámica. Estos estudios pueden estar apoyados sobre ensayos experimentales que reproduzcan estas condiciones. A la hora de realizar ensayos experimentales, para conseguir resultados válidos es necesario cumplir con las normativas e instrucciones relativas a cada tipo de ensayo.

Los organismos más importantes que regulan a nivel internacional los distintos tipos de ensayos mecánicos son la ISO internacional y la ASTM americana. A nivel particular, los ensayos de flexión en tres puntos para polímeros termoestables se recogen en los apartados ASTM D790 y en la ISO 178.

En ambas normativas se especifican los materiales adecuados para el ensayo, las dimensiones máximas y mínimas de la viga y de los apoyos, las características del equipo mecánico en que se va a realizar el ensayo y los procedimientos de toma de datos y de cálculo de las propiedades que permite obtener el ensayo de flexión en tres puntos.

Tanto la ASTM D790 como la ISO 178 tienen en común la gran mayoría de los aspectos a tener en cuenta salvo algunas pequeñas variaciones en las dimensiones y procedimiento que no alteran en gran medida los resultados.

La normativa ASTM D790 permite el cálculo de la resistencia a flexión, la rigidez a flexión, deflexión y todos aquellos parámetros que relacionan tensión y deformación a flexión, de materiales poliméricos termoplásticos fabricados por moldeo o extrusión, descripción que incluye al PEEK. Además las vigas deben ser de sección rectangular con unas relaciones entre las dimensiones tales que la longitud sea aproximadamente 16 veces la altura de la viga, que debe ser como mínimo 3.2 mm. En el caso de estudio, la relación longitud/altura es de 20 y la altura de 5mm., por lo que entraría dentro de lo permitido. En cuanto al procedimiento, el PEEK se incluiría en el Procedimiento B descrito en la normativa ya que es el válido para materiales que sufren grandes deformaciones. Los apoyos y el percutor deben ser cilíndricos en la superficie de contacto con un radio mínimo de 3.2 mm para evitar la entalla y el fallo por concentración de tensiones en la zona de contacto. Este procedimiento B de la norma ASTM D790 establece que se debe someter a la probeta a velocidades de deformación constantes de 0.1 min^{-1} hasta producir la rotura de la misma o en su defecto, conseguir una deformación del 5%. En el caso de estudio se somete al PEEK a velocidades de deformación variadas y distintas a la que aconseja la norma, por lo que no se pueden aplicar directamente las ecuaciones que ofrece la norma para el cálculo de los resultados.

Por otro lado, la normativa ISO 178 coincide en su mayor parte con la anterior. Está definida para los mismos materiales y describe el mismo procedimiento para el ensayo. Las únicas diferencias se encuentran en las dimensiones de la probeta, donde para la ISO 178 es necesario una relación longitud/altura igual a 20 y una anchura de 15 mm aproximadamente para una altura de 5mm., descripción que se ajusta a la probeta de estudio en este trabajo ya que tiene una relación longitud/altura de 20, una altura de 5mm. y una anchura de 20 mm. Además es algo más restrictiva con respecto al radio mínimo de los apoyos y percutor (5mm.) y permite realizar el ensayo a distintas velocidades de impacto y por lo tanto, de deformación.

Una vez explicadas brevemente las principales consideraciones que tienen las dos normativas más relevantes en cuanto a los ensayos de flexión en tres puntos, se puede concluir que las dimensiones de la probeta escogida permitirían realizar un ensayo normalizado. Sin embargo, el comportamiento característico del PEEK debido a sus grandes deformaciones y el interés en conocer su comportamiento a distintas velocidades de deformación obligaría a desarrollar modelos analíticos propios para el cálculo de las variables de estudio.

En vista a las potenciales aplicaciones biomédicas del PEEK como material para prótesis traumatológicas, existen normativas al respecto que regulan su utilización. Concretamente la norma ASTM F2026 regula los métodos de ensayo específicos del PEEK para ser utilizado en implantes o como parte de los aparatos médicos quirúrgicos.

En cuanto a la regulación de los implantes en sí, existen infinidad de normas ASTM e ISO características para cada caso en concreto, que deberían complementar a las anteriores si se diseña un implante de PEEK.

8. Entorno socio-económico.

Es conveniente enmarcar el interés y estudio de materiales como el PEEK en el entorno socio-económico que los rodea, entendiendo entorno socio-económico como todo aquel aspecto de la sociedad actual y de los campos de estudio a los que pertenece, que afecta de manera directa o indirecta la concepción y tratamiento del mismo. A su vez, se produce el efecto inverso, el desarrollo del PEEK y de sus posibles aplicaciones afecta y modifica el entorno socio-económico.

De manera global el estudio de nuevas estructuras ligeras, entre las que se encuentra el PEEK, se ha convertido en un campo de estudio de gran interés en los últimos años. El motivo de este interés se explica en el descubrimiento de las propiedades mecánicas de los mismos con una considerable baja densidad y peso. Esto se traduce en ahorro de costes y energía en aplicaciones relacionadas con el transporte (aeroespacial, automovilístico, ferroviario...) ya que se produce una reducción en peso con un mantenimiento e incluso mejora de algunas propiedades mecánicas de los metales clásicos utilizados en estas aplicaciones.

De manera particular, el PEEK no solo tiene futuro como sustituto ligero de otras piezas metálicas, si no que permite abrir nuevos horizontes en aplicaciones como la biomedicina, sector que avanza a una gran velocidad y donde el PEEK ofrece soluciones que satisfacen las complejas necesidades de un campo cada vez más creciente y al alcance de todos.

A continuación se explican los principales aspectos en los que destaca el PEEK, enmarcados en la situación actual, que permite considerarlo como solución a las aplicaciones anteriores.

8.1. Energía y contaminación.

En un mercado como el de los transportes, con una demanda cada vez mayor de ahorro en costes, consumo y contaminación, el PEEK se presenta como una solución factible que cumple estos requisitos.

Las normativas que regulan el consumo de recursos del transporte aeroespacial, ferroviario y sobre todo automovilístico, son cada vez más estrictas y obligan a los fabricantes y diseñadores a buscar nuevas soluciones que sean rentables en todos los aspectos. Estas normativas tienen como objetivo reducir al máximo el consumo de energía de los vehículos y hacerlos menos contaminantes, premiando a los usuarios y fabricantes que lo cumplen y penalizando a aquellos que sobrepasan los niveles mínimos.

Como ya se ha explicado anteriormente, las propiedades mecánicas del PEEK y su baja densidad permite ser utilizado en este tipo de aplicaciones en sustitución de aluminio o acero en algunas aplicaciones dentro del sector, detalladas en el apartado 4.1.4.2, consiguiendo una reducción en peso global del vehículo manteniendo o incluso mejorando en algunos aspectos su rendimiento.

Esta reducción en peso conseguida con el PEEK es el verdadero punto de interés ya que con ello se necesitaría menos combustible para desplazar el vehículo y a su vez esto reduce la contaminación.

Por otro lado, el PEEK como plástico necesita petróleo en su fabricación, que contrarresta el ahorro de energía y contaminación en las aplicaciones en las que se utiliza. Sin embargo, al tratarse de un polímero termoplástico, este puede ser reciclado, reduciendo el consumo y contaminación, al no tener que ser fabricado solo para un uso y aumentando los potenciales beneficios en las aplicaciones del sector del transporte.

8.2. Seguridad.

El aumento de las regulaciones estrictas en energía y contaminación han sido acompañadas también por un intento de mejora de las condiciones de seguridad en el sector del transporte.

Gracias a la capacidad de deformación y absorción de energía del PEEK, permite desarrollar nuevos sistemas de protección frente a impacto en vehículos de transporte terrestre, ferroviario y aeroespacial. Estas protecciones pueden estar orientadas a proteger piezas importantes de los mismos o a la salud de los usuarios.

Además, su previsible e investigada rotura dúctil favorece su aplicación como protección ya que al no tener una rotura frágil no se desprenden pedazos ante un posible impacto que pueden a su vez convertirse en nuevos proyectiles.

8.3. Medicina.

El mercado mundial de implantes ortopédicos y traumatológicos ha experimentado durante los últimos años un gran periodo de expansión y crecimiento, ligado en buena medida al desarrollo de nuevos productos y al incremento del gasto sanitario en los principales países desarrollados. Las previsiones para las décadas del futuro cercano auguran un crecimiento aún más acusado que en décadas anteriores debido al incremento del porcentaje de personas mayores y de la edad media global de las personas y al aumento del presupuesto sanitario en países en vías de desarrollo.

El mercado global de implantes ortopédicos y traumatológicos se concentra en unas pocas empresas multinacionales, en su mayoría norteamericanas y con sede en Warsaw, Indiana, EEUU; conocido como el clúster de Warsaw.

Como se ha expuesto anteriormente en el apartado 4.1.4.3, el PEEK ofrece soluciones innovadoras al creciente sector biomédico, permitiendo nuevos tratamientos en prótesis traumatológicas con mejor rendimiento, biocompatibilidad y coste que las metálicas.

De este modo, el PEEK es capaz de satisfacer las necesidades de un sector muy cambiante, exigente y en continuo crecimiento permitiendo nuevas aplicaciones orientadas hacia un futuro en la medicina basado en implantes accesibles a todas las personas.

8.4. Costes.

Al tratarse de un material de reciente descubrimiento y aún más reciente estudio e investigación, todavía es un material altamente caro. El desconocimiento del mismo y complejidad provoca que haya apenas fabricantes y con aplicaciones todavía muy limitadas. Esto encarece su fabricación al no contar con procesos desarrollados y en masa del mismo.

Sin embargo, este sobre coste en su fabricación se ve compensado por su reciclabilidad y desempeño en sus aplicaciones. El ahorro en peso y consumo explicado anteriormente se convierte en un ahorro en costes tanto para los usuarios como para los fabricantes, situación que a la larga es beneficiosa para todos y que permitirá su entrada en el mercado como solución a los intentos de todos los sectores de reducir costes lo máximo posible.

El ensayo experimental que complementaría este trabajo y continuaría la línea de investigación también tendría un coste que ha de ser tenido en cuenta. De manera aproximada, el ensayo de flexión en tres puntos del PEEK no tendría diferencias con el resto de ensayos similares con otros materiales salvo en el coste de la materia prima. En este aspecto, el PEEK es un material caro, de aproximadamente 100€/kg, por lo que modelos numéricos que abaraten costes son necesarios.

9. Conclusiones y trabajos futuros.

En el presente trabajo se ha desarrollado un modelo numérico en el código de elementos finitos Abaqus/Explicit con capacidad general, adecuado y validado mediante un modelo analítico en términos de la fuerza de plastificación. Este modelo numérico ha permitido realizar y permite seguir realizando distintas simulaciones para estudiar la influencia de las distintas variables que intervienen en un proceso de dinámico de flexión en tres puntos del polímero PEEK.

El modelo numérico confirma las investigaciones realizadas por otros autores en cuanto a la ausencia de transición dúctil-frágil del PEEK al superarse la temperatura de transición vítrea, mostrando un comportamiento aún más dúctil a partir de ese punto (Millett et al., 2006). Para representar este efecto en el modelo termo-viscoplastico de Johnson-Cook para PEEK, se propone sustituir en el término T_H de la ecuación del modelo, la temperatura de fusión por la temperatura de transición vítrea. De este modo, la influencia estudiada en otros trabajos del comportamiento del PEEK frente a la temperatura se ve más reflejada y la ductilidad del material aumenta al sobrepasar la temperatura de transición vítrea, como se demostró en (Millett et al., 2006).

Un estudio de la influencia del resto de factores de la ecuación de Johnson-Cook sobre el comportamiento del PEEK se ha llevado a cabo. En él, no se aprecia gran diferencia entre el efecto de la temperatura inicial del material y la velocidad de deformación, por lo que ninguno de estos dos efectos prevalece sobre el otro.

Las simulaciones realizadas en el estudio de la influencia de la velocidad de impacto en el comportamiento del PEEK, han resultado en la afirmación de que no se generan fuerzas inerciales en el impacto, es decir, la masa del percutor no es influyente siempre y cuando la energía cinética del proceso sea constante.

También es importante destacar el efecto del módulo de elasticidad en el comportamiento dinámico del PEEK. Gracias a los estudios de Rae et al. que permitieron obtener la variación del módulo de elasticidad frente a la temperatura (Rae et al., 2007), se ha comprobado que el descenso del mismo al aumentar la temperatura inicial del proceso, se traduce en una mayor deformabilidad y ductilidad en condiciones dinámicas, lo que favorece su capacidad de absorción de energía, hecho también investigado en el estudio de Sinmazçelik et al. (Sinmazçelik et al., 2007).

Para continuar en la línea de este trabajo, sería conveniente realizar experimentalmente el ensayo de flexión en tres puntos que aquí se presenta con el objetivo de poder hacer otra validación al modelo numérico y analítico y continuar investigando sobre las condiciones dinámicas del PEEK. Con este ensayo experimental se podría confirmar la modificación realizada en este trabajo al término T_H de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook.

Aparte de los posibles ensayos experimentales futuros del PEEK, también sería interesante realizar simulaciones o ensayos del material reforzado con fibras rígidas de carbono o vidrio y estudiar su influencia. Además, teniendo como objetivo la introducción del PEEK en el sector biomédico en prótesis, se podrían realizar simulaciones de flexión en tres puntos como el aquí presentado pero con vigas con la forma de los huesos que reemplazaría en la prótesis, para conocer su verdadera aplicación ya que es un tipo de esfuerzo muy común en la vida normal de una persona.

En todos los siguientes estudios futuros sería adecuado continuar la investigación en la rotura dúctil del PEEK y terminar de entender su comportamiento a altas temperaturas y velocidades para confirmar su utilización como prótesis o protecciones en transporte donde una rotura frágil generaría consecuencias catastróficas.

10. Anexos.

10.1. Índice de tablas.

Tabla 4.1.1 – Propiedades mecánicas del PEEK a 23°C (Vitrex).

Tabla 4.1.2 – Comparativa de las propiedades mecánicas del PEEK 450G (sin refuerzo) y del PEEK 450CA30 (30% fibra de carbono) a 23°C (Vitrex).

Tabla 4.1.3 – Comparativa de las propiedades mecánicas del PEEK 450G (sin refuerzo), del PEEK 450CA30 (30% fibra de carbono) y del PEEK 450GL30 (30% fibra de vidrio) a 23°C (Vitrex).

Tabla 4.2.1 – Composición de la aleación Al 2024-T3 (May et al., 2011).

Tabla 4.4.1 – Clasificación de los ensayos de flexión en tres puntos según velocidad de deformación.

Tabla 5.2.1 – Parámetros ecuación Johnson-Cook para el PEEK (García-González et al., 2014).

Tabla 5.2.2 – Variación de las constantes elástica del PEEK con la temperatura (Rae et al., 2007).

Tabla 5.2.3 – Densidad, fracción de trabajo plástico y calor específico del PEEK (Rae et al., 2007).

Tabla 5.2.4 – Propiedades elásticas, densidad y masa del percutor.

Tabla 5.3.1 – Detalle de las dimensiones de la sección transversal de la viga.

Tabla 5.4.1 – Valores de la constante de ajuste del término de la temperatura en función de la misma

Tabla 6.2.1 – Valores fijos de las variables de temperatura, densidad y masa del percutor para las simulaciones de variación de la velocidad de impacto.

Tabla 6.2.2 – Valores de la velocidad de impacto, energía cinética y numeración de la simulación para las simulaciones de variación de la velocidad de impacto con los valores fijos de la Tabla 6.2.1.

Tabla 6.2.3 – Valores fijos de las variables de temperatura y velocidad de impacto para las simulaciones de variación de la masa del percutor.

Tabla 6.2.4 – Valores de la masa, energía cinética y numeración de la simulación provenientes de la Tabla 6.2.2 para las simulaciones de variación de la masa con los valores fijos de la Tabla 6.2.3.

10.2. Índice de gráficas.

Gráfica 4.3.1 – Curva tensión-deformación típica de un material.

Gráfica 5.4.1 y Gráfica 5.4.2 – Variación del límite elástico del PEEK en función de la temperatura (izquierda) y de la velocidad de deformación (derecha) (Rae et al., 2007).

Gráfica 5.4.3 – Curva deformación plástica-tiempo típica media de los nodos de la Figura 5.4.1 obtenida del modelo numérico tras una simulación.

Gráfica 5.4.4 – Variación del módulo de elasticidad del PEEK frente a la temperatura (Rae et al., 2007).

Gráfica 5.4.5 – Comparación resultados modelo analítico y numérico de la fuerza de plastificación en función de la temperatura para una velocidad de impacto de 6 m/s y con la temperatura de transición ($T_g = 416$ K) en el término T_H de ecuación de Johnson-Cook (Ecuación [16]).

Gráfica 5.4.6 – Comparación resultados obtenidos del modelo analítico y numérico de la fuerza de plastificación en función de la temperatura para una velocidad de impacto de 8 m/s y con la temperatura de transición ($T_g = 416$ K) en el término T_H de ecuación de Johnson-Cook (Ecuación [16]).

Gráfica 5.4.7 – Comparación resultados modelo analítico y numérico de la fuerza de plastificación en función de la temperatura para una velocidad de impacto de 6 m/s y con la temperatura de fusión ($T_{melt} = 616$ K) en el término T_H de ecuación de Johnson-Cook (Ecuación [13]).

Gráfica 5.4.8 – Comparación resultados modelo analítico y numérico de la fuerza de plastificación en función de la temperatura para una velocidad de impacto de 8 m/s y con la temperatura de fusión ($T_{melt} = 616$ K) en el término T_H de ecuación de Johnson-Cook (Ecuación [13]).

Gráfica 5.2.1 – Curva tensión-deformación experimental y con las constantes de Johnson-Cook del PEEK utilizadas para velocidad de deformación de 100 s^{-1} y 23°C .

Gráfica 6.1.1 – Curvas tensión-deformación para el PEEK sin efecto de los términos de Johnson-Cook, con solo el término de la temperatura para T_g y para T_{melt} a 298 K y 4 m/s de impacto del percutor.

Gráfica 6.1.2 – Deflexión máxima de la viga para velocidad de impacto de 6 m/s con el término T_H modificado (T_g) y sin modificar (T_{melt}) en función de la temperatura.

Gráfica 6.1.3 – Deflexión máxima de la viga para velocidad de impacto de 8 m/s con el término T_H modificado (T_g) y sin modificar (T_{melt}) en función de la temperatura.

Gráfica 6.2.1 – Comparación de las curvas tensión-deformación con la inclusión de los factores de velocidad de deformación y temperatura con el término T_H modificado (T_g) y sin modificar (T_{melt}) a 298 K y 4 m/s de velocidad de impacto.

Gráfica 6.2.2 – Curvas tensión-deformación para distintas velocidades de impacto con las condiciones de las Tablas 6.2.1 y 6.2.2.

Gráfica 6.2.3 – Curvas tensión-deformación para los distintos números de simulación con las condiciones de la Tablas 6.2.3 y 6.2.4.

10.3. Índice de figuras.

Figura 4.1.1 – Ejemplo de enlace simple, doble y triple; respectivamente de izquierda a derecha.

Figura 4.1.2 – Ejemplo de estructura molecular polimérica con cadena principal y distintos radicales.

Figura 4.1.3 – Representación esquemática de la reacción química cuyo resultado es PEEK.

Figura 4.1.4 – Estructura molecular del PEK (arriba) y del PEKK (abajo).

Figura 4.1.5 – Esquema de la composición de una placa sándwich.

Figura 4.1.6 – Suelo de cabina de pasajeros de una aeronave.

Figura 4.1.7 – Distintas partes de un ala de una aeronave.

Figura 4.1.8 – Engranaje hecho en PEEK.

Figura 4.1.9 – De izquierda a derecha, ejemplos de implantes de PEEK vertebrales, en cabeza femoral y craneal.

Figura 4.2.1 – Representación gráfica de la estructura de tipo nido de abeja (honeycomb).

Figura 4.2.2 – Partes de la estructura en una aeronave fabricadas en aluminio y materiales compuestos.

Figura 4.3.1 – Tensiones normales y tangenciales en todas las direcciones de un sólido.

Figura 4.3.2 – Representación gráfica en el espacio de la superficie y lugar de plastificación.

Figura 4.4.1 – Esquema típico de configuración del ensayo de flexión en tres puntos.

Figura 4.4.2 – Deformación típica de viga sometida a ensayo de flexión en tres puntos.

Figura 4.4.3 – Mapa de tensiones normales a la sección de la probeta deformada en ensayo de flexión en tres puntos.

Figura 4.4.4 – Representación del método de aplicación de la carga en el péndulo de Charpy.

Figura 4.4.5 – Representación del método de aplicación de la carga en torre de caída.

Figura 4.4.6 – Detalle de entalla típica en probetas para ensayos de flexión en tres puntos.

Figura 5.1.1 – Dimensiones de la viga.

Figura 5.1.2 – Dimensiones del percutor.

Figura 5.1.3 – Imagen del conjunto viga-percutor en el modelo numérico (Abaqus).

Figura 5.1.4 – Detalle de la partición realizada al percutor en el modelo numérico.

Zona 1: zona de contacto; Zona 2: cuerpo.

Figura 5.1.5 – Detalle de la partición realizada a la viga en el modelo numérico.

Zona 3: parte central; Zona 4: extremos.

Figura 5.1.6 – Detalle del mallado final del percutor y la viga.

Figura 5.2.1 – Detalle de los nodos estudiados para la curva tensión-deformación en el modelo numérico. Vista en alzado (arriba) y planta inferior (abajo).

Figura 5.3.1 – Modelo físico del ensayo de flexión en tres puntos.

Figura 5.3.2 – Detalle de las dimensiones de la sección transversal de la viga.

Figura 5.3.3 – Diagrama de esfuerzos flectores en la viga indicando momento flector máximo.

Figura 5.3.4 – Diagrama de tensiones normales a la sección de la viga producidas por la flexión.

Figura 5.3.5 – Diagrama de esfuerzo cortante en la viga indicando valores máximos.

Figura 5.3.6 – Diagrama de tensiones tangenciales en la sección de la viga por cortante.

Figura 5.4.1 – Detalle de los nodos estudiados para la velocidad de deformación en el modelo numérico. Vista en alzado (arriba) y planta inferior (abajo).

Figura 5.4.2 – Detalle de los nodos estudiados para las reacciones en los apoyos en el modelo numérico. Vista en alzado (abajo) y planta (arriba).

10.4. Índice de ecuaciones.

- [1] – Regla de las mezclas para el límite elástico de materiales tipo sándwich.*
- [2] – Regla de las mezclas para el módulo de elasticidad de materiales tipo sándwich.*
- [3] – Deformaciones longitudinales según campo de desplazamiento del sólido deformable.*
- [4] – Deformaciones angulares según campo de desplazamientos del sólido deformable.*
- [5] – Ecuaciones de compatibilidad del sólido deformable.*
- [6] – Ecuaciones de equilibrio del sólido deformable.*
- [7] – Ley de Hooke en tensores de tensión y deformación.*
- [8] – Ley de Hooke generalizada para deformaciones longitudinales y angulares.*
- [9] – Función de plastificación del sólido deformable.*
- [10] – Criterio de plastificación de Tresca-Guest.*
- [11] – Criterio de plastificación de Von Mises-Hencky-Nadai.*
- [12] – Ecuación constitutiva de Johnson-Cook.*
- [13] – Expresión del término T_H de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook.*
- [14] – Ecuación de la velocidad de deformación plástica de un material.*
- [15] – Ecuación del incremento de temperatura inducido según el modelo viscoplástico de Johnson-Cook.*
- [16] – Expresión modificada con respecto a la Ec. [13] del término T_H de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook.*

- [17] – Ecuación constitutiva de Johnson-Cook para el PEEK sin el efecto de la velocidad de deformación ni de la temperatura.*
- [18] – Ecuación constitutiva de Johnson-Cook para el PEEK sin el efecto de la velocidad de deformación con el término T_H sin modificar (Ec. [13]).*
- [19] – Ecuación constitutiva de Johnson-Cook para el PEEK sin el efecto de la velocidad de deformación con el término T_H modificado (Ec. [16]).*
- [20] – Tensiones normal a la sección de la probeta generadas por momento flector.*
- [21] – Tensión normal máxima en la sección de la viga en función de la fuerza de impacto.*
- [22] – Momento de inercia respecto al eje X de la sección de la viga.*
- [23] – Tensiones tangenciales a la sección de una viga generadas por esfuerzo cortante.*
- [24] – Tensiones tangenciales en vigas de sección rectangular bajo esfuerzo cortante.*
- [25] – Tensión tangencial máxima en la sección de la viga en función de la fuerza de impacto.*
- [26] – Fuerza de plastificación para el modelo analítico en función del límite elástico (Ec. [27]) y del valor del módulo de elasticidad a distintas temperaturas en compresión.*
- [27] – Ecuación de ajuste del límite elástico del PEEK en función de la velocidad de deformación y la temperatura en compresión.*
- [28] – Ecuaciones de la constante de ajuste de la Ec. [27] dependiente de la velocidad de deformación en función de la velocidad de deformación.*
- [29] – Ecuación constitutiva de Johnson-Cook para el PEEK sin el efecto de la temperatura.*

11. Bibliografía y referencias.

- ALCOA. Data and applications of Al 2024-T3. www.alcoa.com.
- ARIAS, A., RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, J.A., RUSINEK, A. (2008). Numerical simulations of impact behaviour of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable projectiles. En: *Engineering Fracture Mechanics*. Elsevier. V. 75, pp 1635-1656.
- AYNAT A., GARCÍA-GONZÁLEZ, D., VAZ-ROMERO, A., RODRÍGUEZ-MILLÁN, M., ARIAS, A. (2014). Numerical modelling of dynamic punch of hybrid metal composite for prosthetic intervertebral discs (IVD). *European Conference on Composite Materials*. (16, 2014, Sevilla).
- CARRADÓ, A., FAERBER, J., NIEMEYER, S., ZIEGMANN, G., PALKOWSKI, H. (2011). Metal/polymer/metal hybrid systems: Towards potential formability applications. En: *Composite Structures*. Elsevier. V. 93, pp 715-721.
- GARCÍA-GONZÁLEZ, D., AYNAT, A., VAZ-ROMERO, A., RODRÍGUEZ-MILLÁN, M., ARIAS, A. (2014). Thermomechanical behaviour of composite sandwich panels of polymer/metal under low-velocity impact. *European Conference on Composite Materials*. (16, 2014, Sevilla).
- GARCÍA-GONZÁLEZ, D., AYNAT, A., VAZ-ROMERO, A., RODRÍGUEZ-MILLÁN, M., ARIAS, A. (2014). High impact velocity on multi-layered composite of polyether ether ketone and aluminium. *European Conference on Composite Materials*. (16, 2014, Sevilla).
- JAEKEL, D.J., MACDONALD, D.W., KURTZ, S.M. (2011). Characterization of PEEK biomaterials using the small punch test. En: *Journal of the Mechanical Behaviour of Biomedical Materials*. Elsevier. V. 4, pp 1275-1282.
- KURTZ, S.M., DEVINE, J.N. (2007). PEEK biomaterials in trauma, orthopedic and spinal implants. En: *Biomaterials*. Elsevier. V. 28, pp 4845-4869.
- KURTZ, Steven M. et al. (2012). *PEEK biomaterials handbook*. Oxford: Plastics Design Library, William Andrew Publishing. ISBN 978-1-4377-4463-7.
- LOUCHE, H., PIETTE-COUDOL, F., ARRIEUX, R., ISSARTEL, J. (2009). An experimental and modelling study of the thermomechanical behaviour of an ABS polymer structural component during an impact test. En: *International Journal of Impact Engineering*. Elsevier. V. 36, pp 847-861.
- MAY, A., BELOUCHRANI, M.A., MANAA, A., BOUTEGHRINE, Y. (2011). Influence of fatigue damage on the mechanical behaviour of 2024-T3 aluminium alloy. En: *Procedia Engineering*. Elsevier. V. 10, pp 198-806.
- MILLETT, J.C.F., BOURNE, N.K., STEVENS, G.S. (2006). Taylor impact of polyether ether ketone. En: *International Journal of Impact Engineering*. Elsevier. V. 32, pp 1086-1094.

- Normativa ASTM, American Society for Testing and Materials, *D790 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. www.astm.org.
- Normativa ASTM, American Society for Testing and Materials, *F2026 Standard Specification for Polyetheretherketone (PEEK) Polymers for Surgical Implant Applications*. www.astm.org.
- Normativa ISO, International Organization for Standardization, *ISO 178 Plastics – Determination of Flexural Properties*. www.iso.org.
- PALKOWSKI, H., SOKOLOVA, O.A., CARRADÓ, A. (2014). Sandwich materials. En: *Encyclopedia of Automotive Engineering*. John Willey & Sons. ISBN 978-0-470-97402-5.
- RAE, P.J., BROWN, E.N., ORLER, E.B. (2007). The mechanical properties of poly(ether-ether-ketone) (PEEK) with emphasis on the large compressive strain response. En: *Polymer*. Elsevier. V. 48, pp 598-615.
- RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, J.A., RUSINEK, A., ARIAS, A. (2011). Thermo-viscoplastic behaviour of 2024-T3 aluminium sheets subjected to low velocity perforation at different temperatures. En: *Thin-Walled Structures*. Elsevier. V. 49, pp 819-832.
- SÁNCHEZ-SÁEZ, S., BARBERO, E., NAVARRO, C. (2007). Analysis of the dynamic flexural behaviour of composite beams at low temperature. En: *Composites Science and Technology*. Elsevier. V. 67, pp 2616-2632.
- SEONG SIK CHEON, TAE SEONG LIM, DAI GIL LEE (1999). Impact energy absorption characteristics of glass fiber hybrid composites. En: *Composite Structures*. Elsevier. V. 46, pp 267-278.
- SINMAZÇELİK, T., YILMAZ, T. (2007). Thermal aging effects on mechanical and tribological performance of PEEK and short fiber reinforced PEEK composites. En: *Materials & Design*. Elsevier. V. 28, pp 641-648.
- VICTREX. PEEK properties guide and applications. www.victrex.com.